

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Výpočet elektrodynamických sil na proudovodné dráze jističe
BC160**

Computing of Electro-Dynamic Forces on Current Conducting Path of
Circuit Breaker BC160

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Hřivnacký**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Výpočet elektrodynamických sil na proudovodné dráze jističe BC160**
Computing of Electro-Dynamic Forces on Current Conducting Path of
Circuit Breaker BC160

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor působení elektrodynamických sil v elektrických přístrojích
3. Vytvořte jedno-pólový FEM model proudovodné dráhy jističe BC160
4. Proveďte analýzu elektrodynamických sil pro zvolenou hodnotu zkratového proudu
5. Vyhodnocení
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje, Praha, 1985, SNTL
- CIGÁNEK, Ladislav. Elektrické přístroje, Praha, 1956, SNTL
- ARTBAUER, Otto. Tepelný výpočet elektrických přístrojů, SVTL Bratislava, 1963, SVŠT Bratislava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. 5. 2014

Podpis autora

Bc. Marek Křiváček

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Petru Kačorovi, PhD., za cenné rady, věcné připomínky, vedení a pomoc při realizaci této práce, bez kterých by nemohla vzniknout. Dále bych chtěl poděkovat firmě OEZ Letohrad s. r. o. za poskytnutí jističe BC 160 a v neposlední řadě své partnerce a rodině za obrovskou podporu a trpělivost při mém studiu.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je proniknout do problematiky elektrodynamických sil působících v proudovodné dráze jističe, respektive vypočítat síly působící v kontaktní úžině jističe pro zadané proudy. Výpočet sil je proveden na počítačovém modelu proudovodné dráhy, který byl vytvořen na základě rozměrů zjištěných ze skutečného jističe. Jistič modelové řady Modeion typ BC 160 byl poskytnut firmou OEZ Letohrad s. r. o. Kromě teoretické části, obsahující obecný popis jističe, popis zmíněného modelu jističe a osvětlení pojmu elektrodynamické síly, je v práci uveden postup výpočtu síly působící v kontaktní úžině, od vytvoření trojrozměrného počítačového modelu až po zhodnocení dosažených výsledků, vypočítaných programem ANSYS Maxwell 16.0.

Klíčová slova

Jistič, proudovodná dráha, mechanismus, západka, nadproudová spoušť, zkratová spoušť, Jistič BC 160, elektrodynamické síly, síla působící v kontaktní úžině, výpočet sil, teoretický kontakt, mikroskop, reálný kontakt, Solid Works, ANSYS Maxwell.

Abstract

The aim of this thesis is more about the problem of electrodynamic forces acting on the current track of the circuit breaker, respektive calculate the forces acting in the contact circuit breaker strait for setting the current. Calculation of forces is done on a computer model of the current track, which was created based on the dimensions obtained from a real circuit breaker. Circuit breaker series Modeion type BC 160, was provided by OEZ Letohrad s. r. o. Apart from the theoretical part, containing a general description of circuit breaker, description of that model circuit breaker and lighting of the term electrodynamic forces, work is how to calculate the forces acting in the contact Strait, from the creation of three-dimensional computer model to evaluation of the results calculated by ANSYS Maxwell 16.0.

Key words

The circuit breaker, current conducting path, mechanism, ratchet, trigger, circuit breaker BC 160, electrodynamic forces, the force in the contact Strait, calculation of forces, theoretical contact intercourse, microscope, the real contact intercourse, Solid Works, ANSYS Maxwell.

Seznam použitých symbolů a značek

Symbol	Název	Jednotka
A	Práce	J
B	Magnetická indukce	T
C_k	Poměr měrných odporů kontaktní úžiny	-
F	Síla	N
F_k	Kontaktní tlak	N
F_{kmin}	Minimální kontaktní tlak	N
F_U	Síla v kontaktní úžině	N
F_V	Vypínací síla pružiny	N
G_m	Magnetická vodivost	H
H	Tvrdost	Pa
H_B	Tvrdost podle Brinella	Pa
I	Elektrický proud	A
I_{CS}	Jmenovitá provozní vypínací schopnost	kA
I_{CU}	Jmenovitá mezní vypínací schopnost	kA
I_k	Zkratový proud	A
I_n	Jmenovitý proud	A
I_r	Redukovaný proud	A
J	Proudová hustota	A/m ²
L	Indukčnost	H
M	Moment	N.m
R	Elektrický odpor	Ω
R_s	Stykový odpor na mezi svaření materiálu	Ω
U	Elektrické napětí	V
$U_{Agsvař}$	Napětí svaření stříbra	V
U_e	Jmenovité napětí	V
μ_r	Relativní permeabilita	-
μ_0	Permeabilita vakua	H/m
Φ	Magnetický tok	Wb

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Jistič	12
2.1	Definice jističe	12
2.2	Spouště.....	12
2.3	Západky a mechanismy	15
2.4	Dělení jističů nn	17
3.	Kompaktní jistič Modeion BC 160	20
3.1	Popis jističe	20
3.2	Konstrukce	22
3.3	Vypínací charakteristika BC 160	25
4.	Elektrostatické síly.....	28
4.1	Síla mezi rovnoběžnými vodiči.....	28
4.2	Síly mezi vodiči v úhlu	31
4.3	Síla působící v kontaktní úžině	33
4.4	Minimální kontaktní tlak.....	34
4.5	Síly působící na vodič v blízkosti feromagnetika	35
5.	Možnosti realizace práce.....	37
5.1	Analytická (klasická) metoda.....	37
5.2	Metoda konečných prvků (MKP)	37
5.3	ANSYS Maxwell	39
6.	Výpočet sil v kontaktní úžině jističe BC 160.....	40
6.1	Specifikace zadání práce.....	40
6.2	Realizace 3D modelu proudovodné dráhy jističe BC 160	40
6.3	Měření kontaktního tlaku jističe BC 160	47
6.4	Vliv proudovodné dráhy	51
6.5	Výpočet síly v kontaktní úžině na základě teoretického kontaktního styku	53
6.6	Výpočet síly v kontaktní úžině na základě reálného kontaktního styku	57
6.7	Výpočet sil v kontaktní úžině pro ověření proudu nadskočení kontaktů	65
7.	Závěr	70
8.	Seznam použité literatury.....	72
9.	Seznam příloh	73

Seznam obrázků

Obr. 2. 1 Princip funkce elektromagnetické spouště [2]	13
Obr. 2. 2 Princip činnosti kataraktové spouště [2]	13
Obr. 2. 3 Princip bimetalové spouště [2]	14
Obr. 2. 4 Tepelná spoušť s nepřímým ohřevem [2]	14
Obr. 2. 5 Ohřev bimetalového článku pro velké jmenovité proudy [2]	15
Obr. 2. 6 Princip činnosti základního provedení západek [2]	15
Obr. 2. 7 Princip činnosti prolomených pák [2]	16
Obr. 2. 8 Systém volnoběžek jističe [2]	17
Obr. 2. 9 Vypínací charakteristiky jističů podle [3]	18
Obr. 2. 10 Roštová zhášecí komora středního jističe	19
Obr. 2. 11 Střední jističe nn [4]	19
Obr. 3. 1 Modeion BC160 [4]	20
Obr. 3. 2 Rozměry jističe BC160 [4]	20
Obr. 3. 3 Štítek jističe BC 160	21
Obr. 3. 4 Příklady nosných a izolační dílů jističe z PA66	22
Obr. 3. 5 Přívodní svorka jističe	23
Obr. 3. 6 Připojovací pás s nadproudovou a zkratovou spouští	23
Obr. 3. 7 Lankový vodič s pohyblivým kontaktním palce a kontaktem	24
Obr. 3. 8 Pevný a opalovací kontakt s připojovacím pásem	24
Obr. 3. 9 Magnetická zhášecí komora jističe BC 160	25
Obr. 3. 10 Kompletní proudovodná dráha Modeionu BC 160	25
Obr. 3. 11 Nastavení vypínací charakteristiky jističe BC 160	26
Obr. 3. 12 Vypínací charakteristika tepelné a zkratové spouště jističe BC 160 [6]	27
Obr. 3. 13 Vypínací charakteristika selektivní spouště [6]	27
Obr. 4. 1 Dva rovnoběžné vodiče [8]	28
Obr. 4. 2 Rozložení vodičů [7]	30
Obr. 4. 3 Uspořádání vodičů pro činitel k_d [7]	31
Obr. 4. 4 Pravoúhlý záhyb [4]	31
Obr. 4. 5 Složený pravoúhlý záhyb [4]	33
Obr. 4. 6 Příklady kontaktních úžin [7]	34
Obr. 4. 7 Umístění elektrického oblouku v blízkosti desky roštové komory [8]	35
Obr. 5. 1 Možné tvary prvků [9]	37
Obr. 5. 2 Postup řešení pomocí numerických metod [11]	38
Obr. 5. 3 Pracovní prostředí ANSYS Maxwell	39
Obr. 6. 1 Počítačový 3D model jističe BC 160 (3VT1)	40
Obr. 6. 2 Řez 3D modelem	41
Obr. 6. 3 Jednopolový 3D model proudovodné dráhy jističe BC 160	42
Obr. 6. 4 Pohyblivý vodič	42
Obr. 6. 5 Modelovaný flexopas	43
Obr. 6. 6 Tvar flexopasu při sepnutých kontaktech	43
Obr. 6. 7 3D model importovaný do programu ANSYS Maxwell	44
Obr. 6. 8 B - H charakteristika Oceli 11 600	45
Obr. 6. 9 Vysíťovaný 3D model proudovodné dráhy jističe BC 160	45
Obr. 6. 10 Vysíťované okolí 3D modelu	46

Obr. 6. 11 Směr toku proudu v 3D modelu proudovodné dráhy.....	46
Obr. 6. 12 Vztažný souřadný systém momentu síly.....	47
Obr. 6. 15 Měřicí soustava s kontrolními nálepkami	49
Obr. 6. 16 Vlastní měření kontaktního tlaku.....	50
Obr. 6. 17 Drátek připevněný k měřicímu ramenu	50
Obr. 6. 18 Jednopolový model s detailem realizovaného kontaktního styku.....	51
Obr. 6. 19 Graf momentu síly M v závislosti na proudu I_k	52
Obr. 6. 20 Kontaktní styk modelovaný na základě teoretických výpočtů.....	54
Obr. 6. 21 Schéma k přepočtu momentu M na sílu F_U , pro teoretický kontaktní styk.....	54
Obr. 6. 22 Graf momentu síly M v závislosti na proudu I_k , pro teoretický kontaktní styk	55
Obr. 6. 23 Graf síly F v závislosti na proudu I_k , pro teoretický kontaktní styk	56
Obr. 6. 24 Graf síly F_U působící v kontaktní úžině v závislosti na proudu I_k , pro teoretický kontaktní styk.....	56
Obr. 6. 25 Kontaktní styk modelovaný na základě reálného	57
Obr. 6. 27 Povrch pevného kontaktu zobrazený ve 3D.....	58
Obr. 6. 28 Schéma k přepočtu momentu M na sílu F_U , pro reálný kontaktní styk.....	58
Obr. 6. 29 Graf momentu síly M v závislosti na proudu I_k , pro reálný kontaktní styk	59
Obr. 6. 30 Graf síly F v závislosti na proudu I_k , pro reálný kontaktní styk	60
Obr. 6. 31 Graf síly F_U působící v kontaktní úžině v závislosti na proudu I_k , pro reálný kontaktní styk.....	60
Obr. 6. 32 Průběh síly F_U v závislosti na proudu s hodnotou proudu nadskočení kontaktů, pro reálný kontaktní styk.....	61
Obr. 6. 33 Rozložení magnetické indukce B (T) v proudovodné dráze a kontaktním styku pro $I_k = 2,6$ kA.....	61
Obr. 6. 34 Rozložení magnetické indukce B (T) v proudovodné dráze a kontaktním styku pro $I_k = 13$ kA.....	62
Obr. 6. 35 Rozložení magnetické indukce B (T) v proudovodné dráze a kontaktním styku pro $I_k = 25$ kA.....	62
Obr. 6. 36 Rozložení vektorů proudové hustoty J (A/m^2) v proudovodné dráze se zobrazením kontaktního styku, pro $I_k = 2,6$ kA.....	63
Obr. 6. 37 Rozložení vektorů proudové hustoty J (A/m^2) v proudovodné dráze se zobrazením kontaktního styku, pro $I_k = 13$ kA.....	63
.....	63
Obr. 6. 38 Rozložení vektorů proudové hustoty J (A/m^2) v proudovodné dráze se zobrazením kontaktního styku, pro $I_k = 25$ kA.....	63
Obr. 6. 39 Kontaktní styk pro nadskočení kontaktů při $I = 2,6$ kA.....	65
Obr. 6. 40 Schéma k přepočtu momentu M na sílu F_U pro modelovaný kontaktní styk.....	65
Obr. 6. 41 Graf momentu síly M v závislosti na proudu I_k - $M = f(I_k)$	66
Obr. 6. 42 Graf síly F v závislosti na proudu I_k - $F = f(I_k)$	67
Obr. 6. 43 Graf síly F_U působící v kontaktní úžině v závislosti na proudu I_k - $F_U = f(I_k)$	67
Obr. 6. 44 Průběh síly F_U v závislosti na proudu s hodnotou proudu nadskočení kontaktů ..	68
Obr. 6. 45 Rozložení proudové hustoty J (A/m^2) v řezu kontaktního styku pro $I = 2839$ A..	68
Obr. 6. 46 Rozložení magnetické indukce B (T) v kontaktním styku pro $I = 2839$ A.....	69

Seznam tabulek

Tab. 3. 1 Normované poměry mezi I_{CS} a I_{CU}	21
Tab. 4. 1 Hodnoty materiálových konstant pro vybrané kontaktní materiály [7]	35
Tab. 6. 1 B – H charakteristika oceli 11 600.....	44
Tab. 6. 2 Hodnoty napětí měknutí a svaření, činitele C_k a tvrdosti podle Brinella H_B pro stříbro [7]	53
Tab. 6. 3 Výsledky sil působících v kontaktní úžině pro teoretický kontaktní styk	55
Tab. 6. 4 Hodnoty momentů a sil pro grafické znázornění výsledků v proudové úžině teoretického kontaktního styku	55
Tab. 6. 5 Výsledky sil působících v kontaktní úžině reálného kontaktního styku, pro zadané proudy	59
Tab. 6. 6 Hodnoty momentů a sil pro grafické znázornění výsledků v proudové úžině reálného kontaktního styku	59
Tab. 6. 7 Výsledky sil působících v kontaktní úžině pro zadané proudy.....	66
Tab. 6. 8 Hodnoty momentů a sil pro grafické znázornění výsledků v proudové úžině modelovaného kontaktního styku	66

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá výpočtem elektrodynamických sil působících na proudovodnou dráhu jističe BC 160, respektive výpočtem sil působících v kontaktní úžině jističe BC 160. Práce je rozdělena na teoretickou část a část obsahující realizaci zadání.

První kapitola teoretické části je uvedením do problematiky jističů společně s popisem prvků, které jsou v jističi obsaženy. Zde jsou vysvětleny pojmy, např. jistič, spouště a mechanismy. Následující kapitola je věnována zkoušenému jističi modelové řady Modeion typu BC 160. Tato kapitola poskytuje bližší popis jističe, který je potřebný k hlubšímu proniknutí do dané problematiky. Další kapitola, která spadá do teoretické části práce, popisuje elektrodynamické síly. Je zde vysvětlen pojem elektrodynamická síla společně s uvedením vybraných druhů sil působících na vodiče, kterými protéká elektrický proud. V poslední kapitole jsou rozebrány možnosti realizace zadání práce, včetně zhodnocení výhod a nevýhod popsaných metod. Dále je v této kapitole uveden stručný popis programu ANSYS Maxwell.

V části diplomové práce nazvané „Realizace zadání práce“ je nejprve uvedena podkapitola obsahující specifikaci zadání, za ní následuje podkapitola popisující měření kontaktního tlaku jističe BC 160, společně s dosaženými výsledky. Další prostor je věnován postupu vytvoření trojrozměrného modelu jednoho pólu jističe BC 160, na který navazuje popis práce ve zvoleném výpočetním programu s grafickými ukázkami. Následně jsou zde vypočteny síly působící v kontaktní úžině jističe pro tři typy kontaktních styků. Výsledky výpočtů momentů a sil jsou zaznamenány v tabulkách a následně zobrazeny v grafické podobě. Pro každý ze zvolených kontaktních styků jsou uvedeny proudy, při kterých podle výpočtu dojde k nadskočení kontaktů jističe BC 160. Další zhodnocení dosažených výsledků je zaměřeno na rozložení magnetické indukce a proudové hustoty v jednopólové proudovodné dráze jističe BC 160.

2. Jistič

2.1 Definice jističe

Jistič, jak uvádí [1], je samočinný, spínací, elektrický přístroj nízkého napětí, který při poruchových poměrech v síti (zejména při nadproudu, zkratu či podpětí), automaticky rozpojí elektrický obvod, aby nedošlo k úrazu elektrickým proudem nebo k poškození, případně zničení zařízení, které jistí. Jistič je sloučením (slučuje) funkce vypínače a pojistky do jednoho celku, má však oproti pojistce výhodu v opakovatelném použití. Jistič má čtyři stabilní polohy – zapnuto (ON), vypnuto (OFF), vybaveno (TRIP) a nataženo (RESET), (nataženo je u většiny přístrojů totožné s polohou vypnuto). V zapnuté poloze je sepnutí kontaktů zajišťováno západkovými systémy. K nastřádání energie v pružině dojde při operaci reset a při operaci on. Nastane-li v jištěném obvodu abnormální stav, např. přetížení nebo zkrat, dojde k uvolnění zámků a působením energie nashromážděné v hlavní pružině mechanismu jsou kontakty jističe od sebe oddáleny.

K tomuto účelu je jistič vybaven spouštěmi. Jsou to tepelná a elektromagnetická spoušť, případně další spouště, jako např. podpěťová nebo vypínací spoušť. [2] Tepelná spoušť slouží k vypínání nadproudů, elektromagnetická spoušť pak k vypínání zkratových proudů. Mezi základní parametry jističů patří jmenovité pracovní napětí mezi fázemi (U_e), jmenovitý proud jističe (I_n) a zkratová vypínací schopnost jističe. Pod pojmem zkratová vypínací (zapínací) schopnost jističe rozumíme podle [1] schopnost jističe, pro kterou předepsané podmínky zahrnují zkrat, neboli velikost zkratového proudu, který je jistič ještě schopen vypnout.

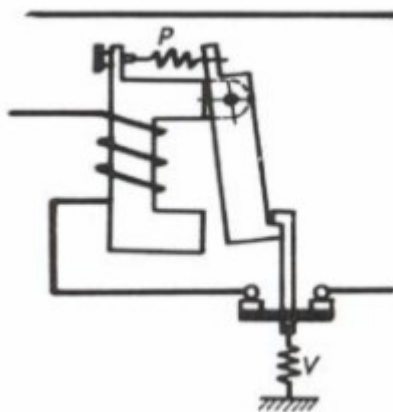
2.2 Spouště

Spoušť, jak je uvedeno v [2], je prvek jističe, který vybavuje západkový systém jističe. Nadproudová spoušť se skládá z proudovodné dráhy a z mechanismu, který uvádí v činnost tepelný nebo elektromagnetický účinek proudu. Spouště mohou být také elektronické. Elektronické spouště můžou být řešeny pomocí diskrétních součástek a integrovaných obvodů, kde dochází k měření elektrického proudu pomocí měřicího transformátoru proudu. Termomagnetické spouště jsou realizovány pomocí bimetalových prvků pro nadproudy (časově závislé spouště) a magnetickými obvody (nebo elektromagnety) pro vyhodnocení zkratových proudů (časově nezávislé). Spouštěmi protéká proud jištěného obvodu. Uvedení spouště do činnosti nastává v okamžiku překročení nastavené hodnoty proudu.

Podle toho, jak je vinutí spouště uspořádáno a připojeno k síti, dělíme spouště na přímé, nepřímé, primární a sekundární. Spouští přímou protéká celá velikost proudu jištěného obvodu. Pokud se jedná o proudy velké nebo sítě VN, kde musí být mechanismus spouště izolačně oddělen, je vinutí spouště napájeno přes transformátor proudu. V tomto případě se jedná o spoušť nepřímou sekundární, kde proud nepůsobí přímo na vybavovací element jističe, ale prostřednictvím pomocného obvodu, který ovládá svým kontaktním systémem. Sepnutím pomocného systému zavede proud do vinutí vlastní spouště působící přímo na západkový systém. [2]

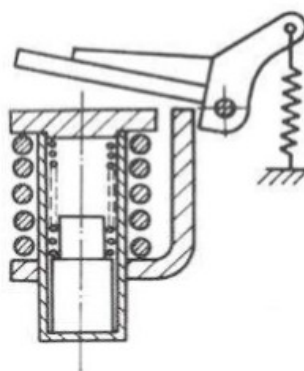
Elektromagnetické spouště

Princip činnosti je uveden na Obr. 2. 1. Jak uvádí [2], prochází cívkou mžikové spouště proud jištěného obvodu. Je zřejmé, že kotva elektromagnetu má funkci zámku a drží kontakty proti tahu pružiny V v zapnutém stavu do okamžiku, kdy obvodem začne procházet tak velký proud, že tah elektromagnetu překoná tah pružiny P a kotva se přitáhne. Kontakty odpadnou, obvod se přeruší a kotva rovněž odpadne.



Obr. 2. 1 Princip funkce elektromagnetické spouště [2]

Dalším typem elektromagnetické spouště, podle [2], je tzv. zpožděná kataraktová spoušť (Obr. 2.2). Ocelové jádro ve tvaru válce je umístěno v dutém válci z nemagnetického kovu, např. z mosazi. Jádro je tlačeno do základní polohy pružinou uvnitř válce. Dutý válec je vyplněn olejem, který slouží jako brzdící kapalina. Čím větší je procházející proud, tím rychlejší je pohyb jádra. Při zkratovém proudu vznikne silné magnetické pole, které mžikově přitáhne kotvu i přes velkou vzduchovou mezeru elektromagnetu. Kotva se přitom přiblíží k pólovému nástavci a dojde k vybavení jističe. Je třeba poznamenat, že v současné době se výrobci jističů opět vracejí ke kataraktovým spouštím, protože tato spoušť slučuje funkci nadproudové a zkratové spouště dohromady.

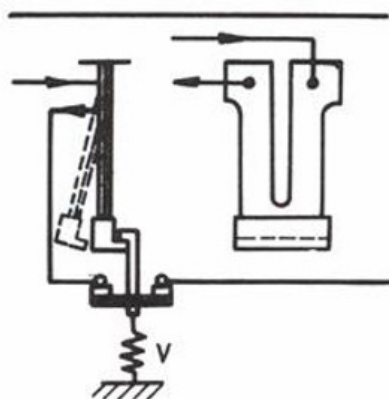


Obr. 2. 2 Princip činnosti kataraktové spouště [2]

Tepelné spouště

Tepelné spouště jsou zpravidla realizovány pomocí bimetalu. Princip bimetalu je založen na různé tepelné roztažnosti dvou kovových materiálů. Zahřátím těchto kovů, buď

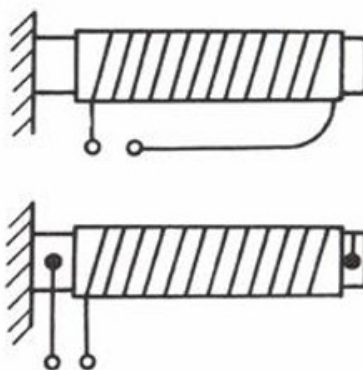
vlastním průchodem proudu, nebo jiným tepelným článkem, dochází k různému roztahování kovů a pásek z těchto kovů se prohne na stranu kovu s menší tepelnou roztažností.



Obr. 2. 3 Princip bimetalové spouště [2]

Na Obr. 2. 3 je zobrazena přímotopná bimetalová spoušť s oběma přívody pevnými. Pokud není bimetalový pásek zahřátý, drží kontakty v sepnutém stavu. Slouží tedy zároveň jako západka. Dojde-li vlivem procházejícího nadproudu k zahřátí pásku, vyhne se na stranu kovu s menší tepelnou roztažností a díky tomu dojde k vypnutí kontaktů.

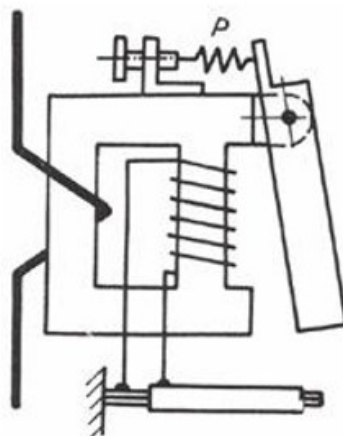
Dalším typem bimetalové spouště (viz Obr. 2. 4) je spoušť s ohřevem nepřímým a probíhajícím pomocí topného vodiče navinutého kolem bimetalového pásku. Používá se zpravidla u jističů se jmenovitým proudem do 6 A, kdy proud procházející bimetalovým páskem nemá potřebnou velikost na to, aby dostatečně vyhřál bimetal. Dvojkov je buď umístěn zcela mimo elektrický obvod, nebo je zařazen do série s topným vodičem. Nevýhodou tepelné spouště dvojkovové je její závislost na teplotě okolí.



Obr. 2. 4 Tepelná spoušť s nepřímým ohřevem [2]

Pro efektivnější využití vlastností mžikových a tepelných spouští se používá hlavně v obvodech nízkého napětí kombinace obou spouští. K vypínání nadproudů od 1,2 násobku jmenovitého proudu se využívá tepelná spoušť, pro vyšší násobky proudu se uplatňuje elektromagnetická mžiková spoušť. U spouští pro velké jmenovité proudy jsou tepelné spouště napájeny sekundárním vinutím malých transformátorů, které jsou upraveny tak, aby zároveň působily jako mžikové spouště.

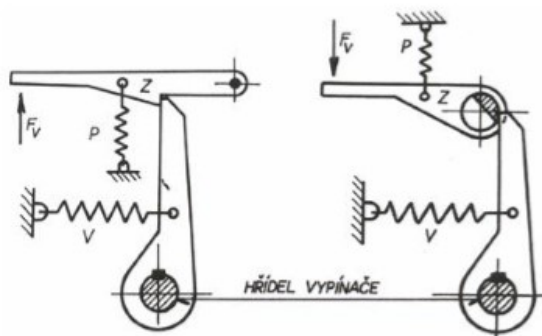
Sekundární vinutí je napojeno na nepřímo vyhřívaný bimetalový článek (viz. Obr. 2. 5). Rozptylový magnetický tok se uzavírá přes přidavnou kotvu, která je spojena se zámkem. Průřez jádra transformátoru musí být zvolen tak, aby od určitého nadproudu došlo k přesycení jádra. Toto má za následek téměř konstantní sekundární proud, což vede k zabránění poškození bimetalového prvku nadměrným proudem. [2]



Obr. 2. 5 Ohřev bimetalového článku pro velké jmenovité proudy [2]

2.3 Západky a mechanismy

Mechanismy, které drží kontaktní ústrojí jističů v zapnuté poloze, jsou západky a volnoběžky. Jejich vypnutí je možno provést pomocí spouště (při zkratu, nebo přetížení), nebo ručně pákou, případně tlačítkem. Síla pro vybavení západky nesmí být velká. Jednoduché typy západek jsou konstruovány jako zámky nebo prolomené páky. Složitější západky jsou realizovány z několika jednoduchých západek. Těmto západkám říkáme volnoběžky. [2]

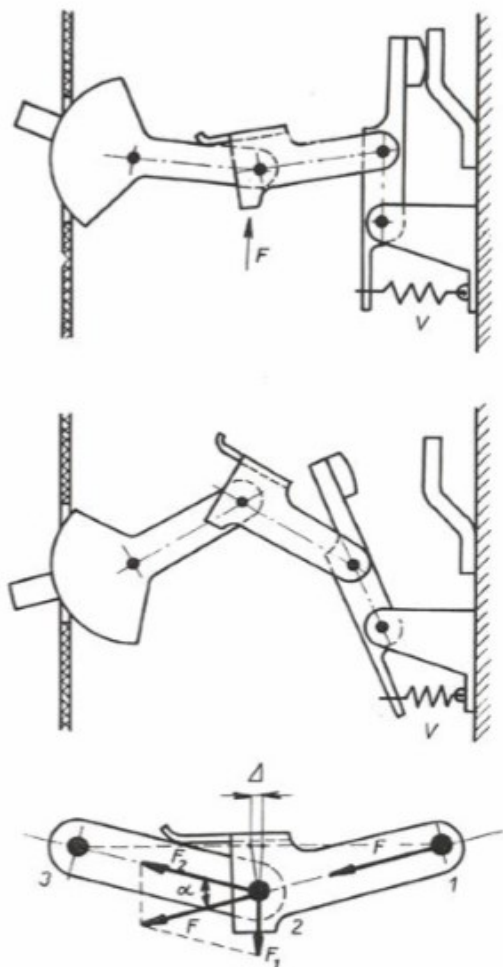


Obr. 2. 6 Princip činnosti základního provedení západek [2]

Při zapínání hlavní páky vlevo na Obr. 2. 6 si tato páka pomocí šikmé plochy nadzdvihne západku Z , proti působení pružiny P , která drží západku v zamykací poloze. Při překonání šikmého náběhu hlavní pákou dojde k uzamčení této páky pomocí západky. Díky působení vypínací síly F_V se západka nadzdvihne a vypínací pružina V přitáhne hlavní páku a dojde k vypnutí kontaktů jističe.

Na podobném principu pracuje mechanismus na Obr. 2. 6 vpravo. Páková západka je zde nahrazena hřídelovou západkou. Při zapínání dojde k pootočení hřídelové západky Z pomocí šikmého náběhu na hlavní páce, proti působení pružiny P . Celý proces je dokončen dosednutím hlavní páky do uzamčené polohy. Působením vypínací síly F_V dojde k natočení hřídelové západky a následně k uvolnění hlavní páky a vypnutí kontaktního ústrojí jističe pomocí vypínací pružiny V .

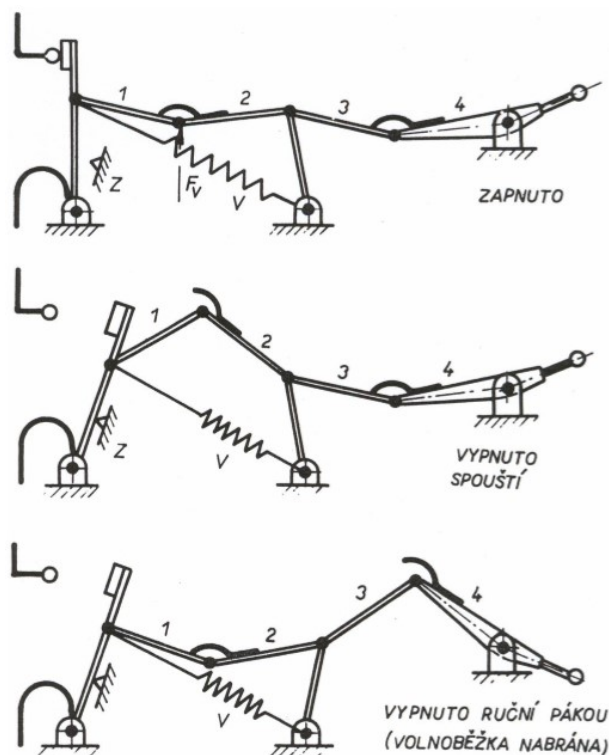
Pro dosažení citlivosti a malé síly F_V těchto mechanismů je proveden přesah stykových ploch západky co nejmenší, nesmí však být příliš malý, aby nedošlo k vybavení jističe vlivem vibrací a rázů.



Obr. 2. 7 Princip činnosti prolomených pák [2]

Dalším typem západek, jak uvádí [2], je systém prolomených pák, který je zobrazen na Obr. 2. 7. Jedno rameno prolomených pák je spojeno s kontaktem a druhé s ručním ovládačem. V zapnuté poloze jsou páky mírně prolomeny za mrtvou polohu. Mrtvou polohou rozumíme polohu, kdy jsou páky v jedné rovině. Prolomení udává zarážka na jedné z pák. Vlivem působení vypínací síly F_V na kloub prolomených pák se páky dostanou z mrtvé polohy a následně vypínací pružina V oddálí kontaktní ústrojí a jistič se vypne. Čím je menší prolomení pák, tím je menší i vypínací síla F_V působící proti síle F_I (viz. Obr. 2. 7), a tím je kratší i vypínací doba pro oddálení kontaktů.

Z Obr. 2. 7 je zřejmé, že zároveň s pohybem kontaktů dochází k pohybu i ručního ovládání jističe. Tato skutečnost může působit nepříznivě v okamžiku, kdy dojde k ručnímu zapnutí instalačního jističe do zkratu. Při sepnutí kontaktů do zkratu bude obvodem procházet plný zkratový proud, což může být řádově až v sekundách, protože síla ruky působí proti vybavovací síle F_V obou spouští. V obvodech VN je vybavovací síla tak velká, že může dojít ke zranění obsluhy automatického vypínače. Proto se u jističů a samočinných vypínačů používají volnoběžky vytvořené ze západek, vzpěr, nebo kombinací obou způsobů.



Obr. 2. 8 Systém volnoběžek jističe [2]

Na Obr. 2. 8 je principiální provedení volnoběžky tvořené ze dvou vzpěr. Při zapnutí se oba systémy dostanou do mrtvé polohy. Jak je zřetelné z Obr. 2. 8 mezi pákami 1 a 2, 3 a 4 jsou umístěny klouby. Dojde-li k abnormálnímu provoznímu stavu, působí vypínací síla na kloub mezi pákami 1 a 2, pak vypínací pružina V oddálí kontakty, přičemž páky 3 a 4 zůstanou neprolomeny a tudíž ovládací páka setrvá v poloze zapnuto. Vypnutí vybavením spouště, musí být signalizováno obsluze. Pro zapnutí jističe je nutné zatlačit páku 4 dolů a následně tahem nahoru dojde k zapnutí. Ruční vypnutí nastane zatažením ovládací páky směrem dolů, čímž se prolomí páky 3 a 4, zatímco páky 1 a 2 zůstanou neprolomeny. V případě sepnutí do zkratu budou vybaveny vypínací silou páky 1 a 2, aniž by byly ovlivňovány dobou držení ovládací páky 4, protože síla F_V se nepřenáší na tuto páku.

2.4 Dělení jističů nn

Jističe nn dělíme:

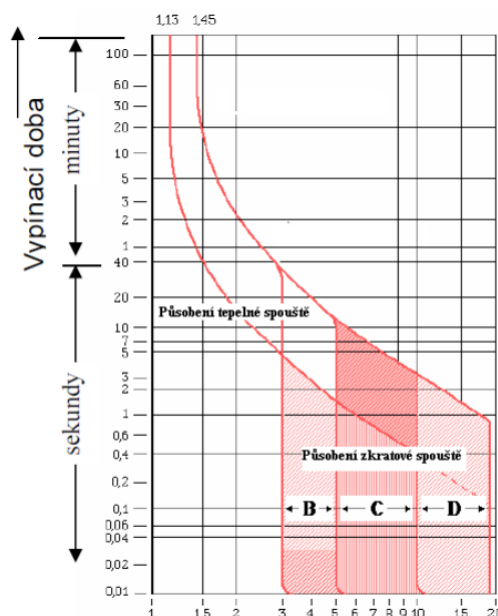
a) Podle jmenovitého proudu I_N (A)

- Drobné jističe – do 25 A
- Střední jističe – do 600 A

- Velké jističe – nad 600 A

b) Podle vypínací charakteristiky

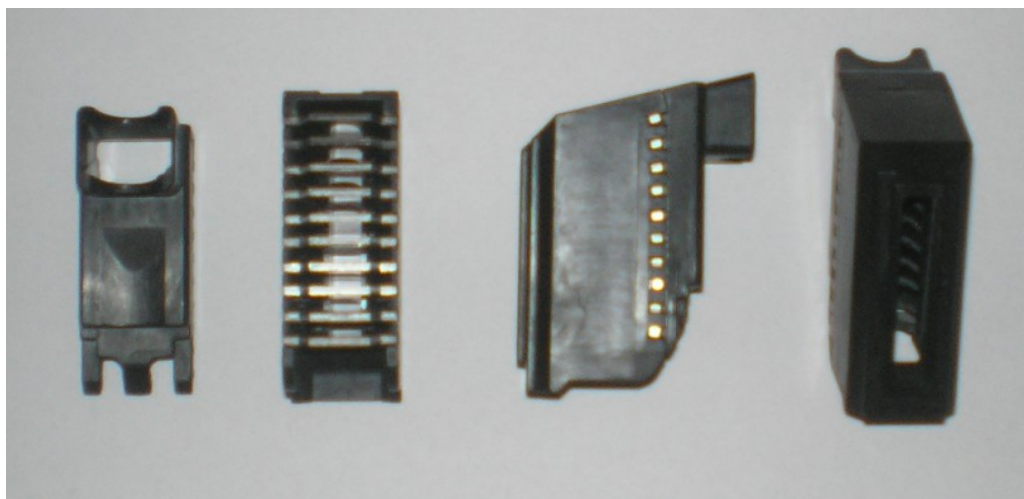
- B – Jističe pro jištění vedení
- C – Jističe pro jištění spotřebičů včetně malých motorů
- D – Jističe pro jištění velkých motorů nebo transformátorů



Obr. 2. 9 Vypínací charakteristiky jističů podle [3]

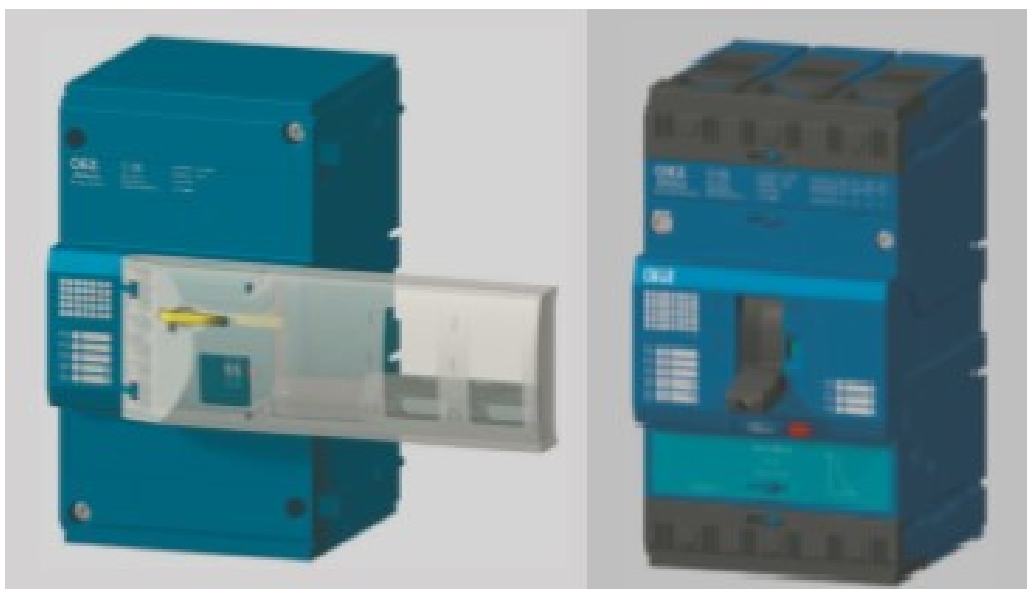
Střední jističe nn

Tyto jističe, jak uvádí [2], nacházejí uplatnění zejména v distribučních rozvodech pro jištění většího počtu elektrických spotřebičů. Protože střední jističe pracují s vyššími proudy než jističe drobné, jsou oproti nim vybaveny dvojicí kontaktů a to hlavními kontakty, které slouží a jsou dimenzovány pro průchod jmenovitého proudu a krátkodobé zatížení zkratovým proudem. Dále je osazen opalovacími kontakty, které jsou navrženy tak, aby odolávaly tepelným účinkům elektrického oblouku při provozním vypínání, ale i při vypínání nebo zapínání zkratového proudu. Elektrický oblouk je u těchto jističů zhasený pomocí magnetického vyfukování do roštové zhasací komory, ve které je umístěn kontaktní systém jističe. Příklad takové komory je zobrazen na Obr. 2. 10.



Obr. 2. 10 Roštová zhášecí komora středního jističe

Střední jističe používají spouště, které jsou nastavitelné (mechanicky, elektronicky nebo pomocí programu) v určitém proudovém rozsahu. Díky nastavitelnosti spouště lze seřadit přístroj podle nároků jištěného zařízení a zároveň zajistit selektivitu jištění. Jistič lze doplnit o celou řadu spouští, např. o podpět'ovou spoušť reagující na pokles napětí v jištěném obvodu. Tato spoušť je výhodná zvláště pro jištění točivých strojů, protože při výskytu podpětí v obvodu rozpojí elektrický obvod a motor se zastaví. Díky této spoušti nedojde k samovolnému rozběhu po obnovení napětí. Jističe lze ovládat ručně nebo pomocí pohonu, nejčastěji pomocí elektrického motoru. Elektromotorový pohon je výhodný pro dálkové ovládání, ale musí být opatřen pomocnými kontakty zajišťující signalizaci stavu přístroje. Na Obr. 2. 11 je zobrazen střední jistič s elektromotorovým ovládáním (vlevo), s ručním ovládáním (vpravo). [2]



Obr. 2. 11 Střední jističe nn [4]

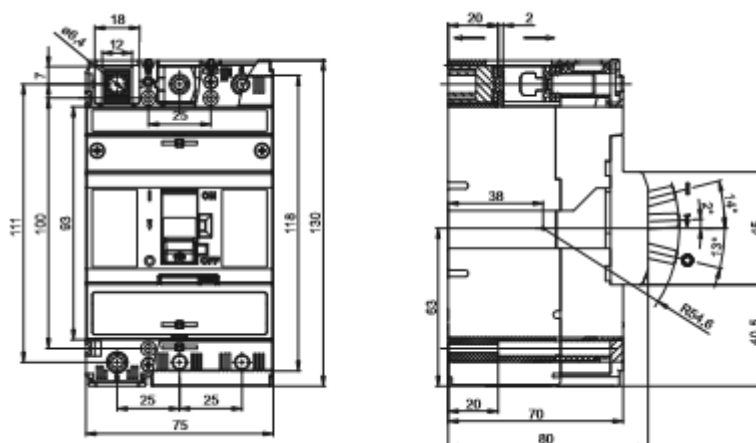
3. Kompaktní jistič Modeion BC 160

3.1 Popis jističe



Obr. 3. 1 Modeion BC160 [4]

Jistič BC160, zobrazený na Obr. 3. 1, patří do přístrojové řady Modeion, vyvinuté společností OEZ s. r. o. sídlící v Letohradě. Se jmenovitým proudem 160 A se řadí do kategorie středních jističů. Podle [5] se Modeion BC 160 se svými rozměry, které jsou patrné z Obr. 3. 2, řadí k nejmenším přístrojům na světě. Jmenovitý proud 160 A a napětí 230 V znamenají výkon 110 kW, což stačí pro větší bytový dům nebo provozovnu.



Obr. 3. 2 Rozměry jističe BC160 [4]

BC 160 s vypínací schopností 25 kA pro 400 V, jak uvádí [5], je vhodný i k jištění transformátorů. Díky tomuto zkratovému proudu jej lze použít i jako vývodový jistič.

Nejvyšší provozní napětí 690 V umožňuje použití i v soustavách 690/500 V. Pro lepší objasnění problematiky vypínací schopnosti udává [1] jmenovitou mezní zkratovou vypínací schopnost I_{CU} a jmenovitou provozní zkratovou vypínací schopnost I_{CS} jističe. Tyto dva parametry jsou uvedeny na štítku jističe, viz Obr. 3. 3.



Obr. 3. 3 Štítek jističe BC 160

I_{CU} – vyjádřena jako hodnota předpokládaného vypínacího proudu v **kA**, v případě střídavého proudu je to efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu.

I_{CS} – vyjádřena jako hodnota předpokládaného vypínacího proudu v **kA** odpovídající jednomu z určených procent jmenovité mezní zkratové vypínací schopnosti podle Tab. 1 a zaokrouhlená na nejbližší celé číslo. Může být vyjádřena jako procentní hodnota z I_{CU} , například $I_{CS} = 25 \% I_{CU}$.

Tab. 3. 1 Normované poměry mezi I_{CS} a I_{CU}

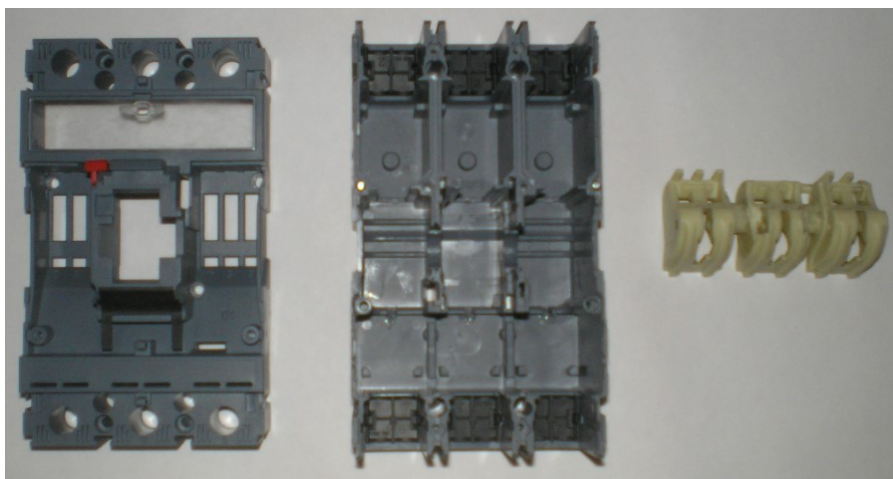
Kategorie užití A	Kategorie užití B
% I_{CU}	% I_{CU}
25	---
50	50
75	75
100	100

Jistič byl vyvinut v několika variantách, které umožňují jištění obvodů vedení, jištění průmyslových aplikací nebo přímé jištění motorů. Varianta s charakteristikou **L** je určena pro jištění obvodů vedení. Jistič se vyznačuje nastavením zkratové spouště na čtyřnásobek jmenovitého proudu. Charakteristika **D** jističe BC160 je vhodná pro průmyslové aplikace,

protože dovoluje nastavení jmenovitého proudu, ale i zkratové spouště. Proto je možno touto obměnou jistit vedení i zařízení s velkým záběrným proudem. Pro jištění motorů do 100 A jmenovitého proudu je nutno použít variantu s charakteristikou *M*. Ovládací prvek nadproudové spouště umožňuje regulaci jmenovitého proudu a zkratová spoušť je nastavena na desetinásobek jmenovitého proudu. BC 160 nabízí i další možnost použití, tj. jistič jen se zkratovou spouští s charakteristikou *N*. Přístroj je vhodný pro jištění například svařovacích transformátorů. V neposlední řadě je zde možnost použití odpínače *V*, tedy přístroj bez spouští. [5]

3.2 Konstrukce

Všechny izolační a nosné části Modeionu BC 160 (vyjma pláště zhášecí komory) jsou tvořeny výlisky z Polyamidu 66 (*PA66*), do kterého je přidáno **30 %** skelného vlákna pro zlepšení mechanických vlastností tohoto materiálu a barevný pigment kvůli estetické stránce. *PA66* je jedním z nejuniverzálnějších termoplastů používaných vzhledem k vynikající rovnováze mezi pevností v tahu a tepelné odolnosti nejen v konstrukci elektrických přístrojů.

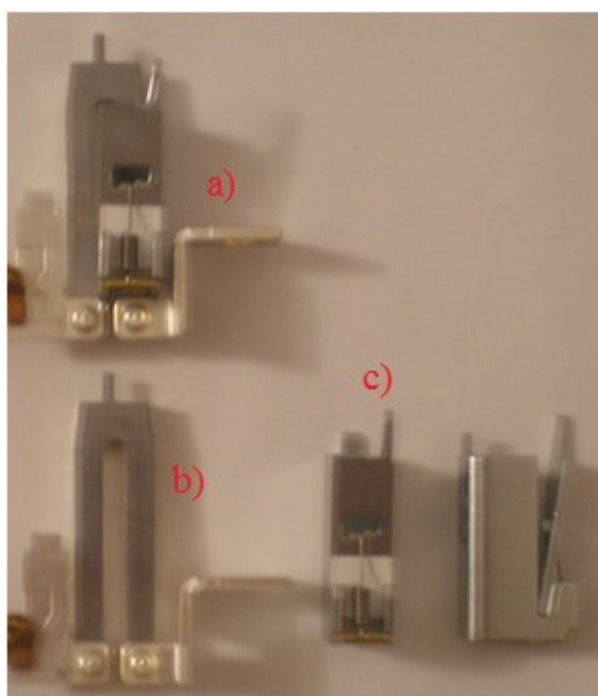


Obr. 3. 4 Příklady nosných a izolačních dílů jističe z *PA66*

Proudovodnou dráhu jednoho pólu jističe BC 160 tvoří přívodní svorka vylisovaná z mosazného pásu, znázorněna na Obr. 3. 5. Svorky jsou připevněny k přívodním pásům z mědi s galvanickým postříbřením, viz Obr. 3. 6 a). Dále je přívodní pás spojen pomocí nýtu s nepřímou nadproudovou spouští tvořenou topným páskem z mědi, rovněž s galvanickým postříbřením a bimetalovým prvkem. Dvojkov je realizován pomocí pásu z mědi a pásu z kanthalu, zobrazený na Obr. 3. 6 b). Topný vodič a dvojkov obepíná magnetický obvod zkratové spouště vyrobený z ocelového pásu válcovaného za studena, viz Obr. 3. 6 c). Z Obr. 3. 6 je zjevné, že topný vodič tvoří vinutí a společně s magnetickým obvodem realizuje elektromagnet.

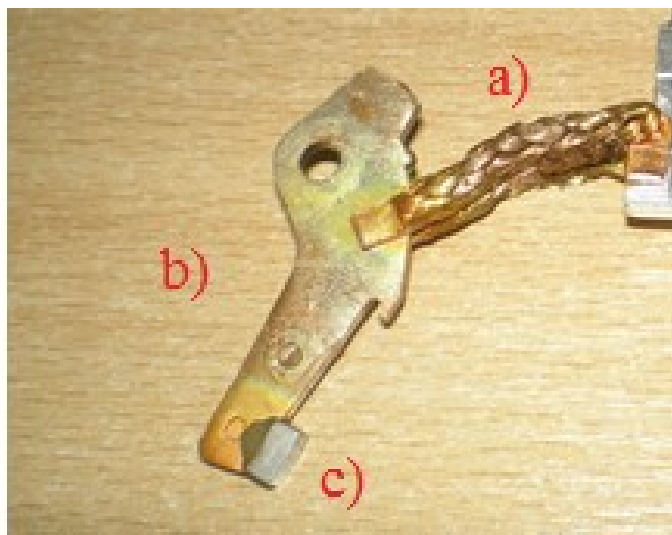


Obr. 3. 5 Přívodní svorka jističe



Obr. 3. 6 Připojovací pás s nadproudovou a zkratovou spouští

Z topného pásu vede proudovodná dráha dále k měděnému lankovému vodiči zajišťující pružný spoj mezi spouštěm a pohyblivým kontaktem, viz Obr. 3. 7 a). Ohebný vodič je k pohyblivému palci kontaktu připevněn pomocí pájeného spoje. Pohyblivý kontaktní palec je odlitek z mědi bez galvanického pokovení, zobrazený na Obr. 3. 7 b). Jako kontaktní materiál jsou použity slinutiny **AgWC(X)** pro pohyblivý kontakt a **AgC(X)** pro kontakt pevný, viz Obr. 3. 7 c) a Obr. 3. 8 a). Ten je doplněn opalovacím kontaktem, na Obr. 3. 8 b) vylišovaným z ocelového pásu galvanicky poměděného a speciálním druhem izolačního papíru (Obr. 3. 8 c)), který zabráňuje vniknutí oblouku a následnou devastaci připojovacího pásu, na Obr. 3. 8 d), ke kterému je pevný kontakt připevněn.



Obr. 3. 7 Lankový vodič s pohyblivým kontaktním palce a kontaktem

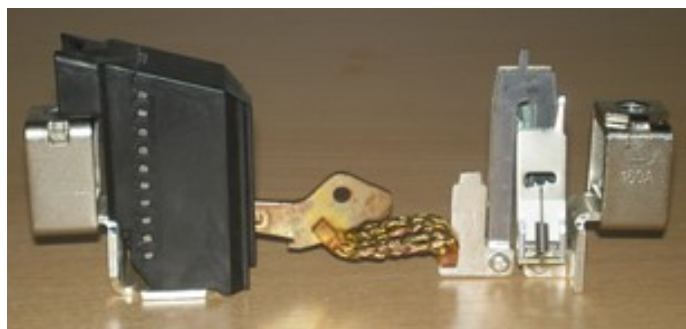


Obr. 3. 8 Pevný a opalovací kontakt s připojovacím pásem

Dalším prvkem proudovodné dráhy Modeionu BC 160 je roštová zhášecí komora zobrazená na Obr. 3. 9. Plášť zhášecí komory, viz Obr. 3. 9 a), tvoří výlisek z reaktoplastu a je jediným prvkem, u něhož je použit reaktoplast z důvodu vysoké teploty elektrického oblouku (řádově tisíce °C). Lamely magnetické zhášecí komory, na Obr. 3. 9 b), jsou vyrobeny z nerezové oceli, která je silně magnetická. Zhášecí komora pracuje na principu síly působící na vodič v blízkosti feromagnetika.



Obr. 3. 9 Magnetická zhášecí komora jističe BC 160



Obr. 3. 10 Kompletní proudovodná dráha Modeionu BC 160

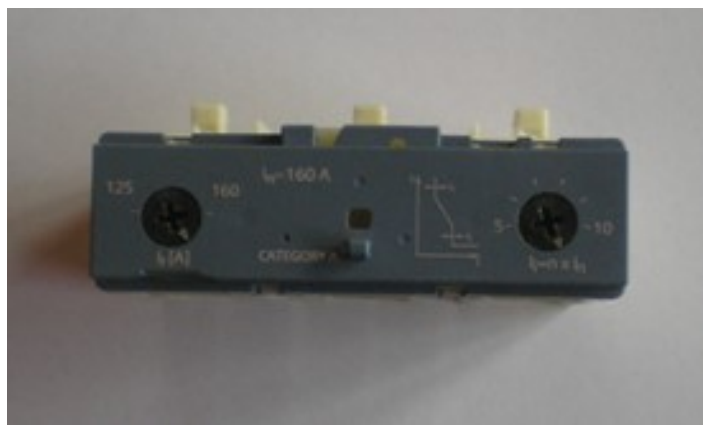
3.3 Vypínací charakteristika BC 160

Nadproudová spoušť je součást jističe plnící funkci měřícího prvku pro monitorování procházejícího proudu. Hlavním úkolem spouště je dát impuls k vybavení jističe a rozpojení jištěného obvodu, ve kterém nastal abnormální stav, např. přetížení. Maximální hodnotu dovoleného proudu udává vypínací charakteristika jističe, resp. nadproudové spouště. Vypnutí na základě popudu od spouště obstarává spínací systém, který je další důležitou součástí jističe. [6]

Vypínací charakteristiku můžeme rozdělit do dvou pásem:

1. Chrání proti přetížení – Tepelná spoušť

Podle [6] je toto pásmo označené jako závislá časová spoušť, protože čas vypnutí závisí nepřímo na velikosti proudu, tzn. čím je větší přetížení, tím spoušť vypne v kratším čase, který je dán vypínací charakteristikou. Maximální přetížení je dáno jmenovitým proudem I_n , resp. redukováným proudem I_r , který lze u BC 160 nastavit pomocí stavěcího šroubu (viz Obr. 3. 11).



Obr. 3. 11 Nastavení vypínací charakteristiky jističe BC 160

Dále [6] uvádí dvě hodnoty časů a proudů, které musí jistič splňovat:

Smluvený nevypínací proud – Jistič nesmí vypnout $1,05 I_n$, resp. I_r do 2 hodin.

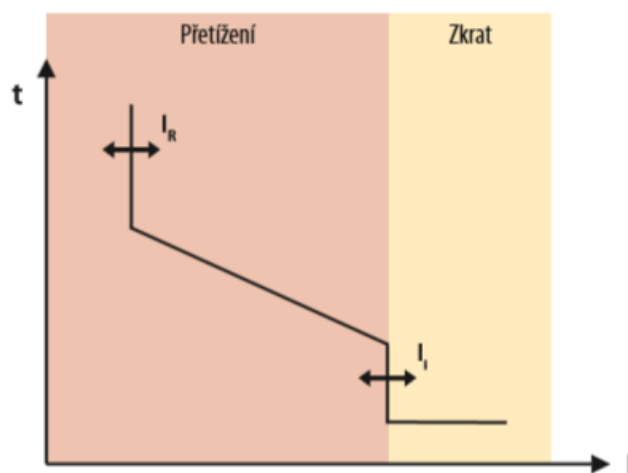
Smluvený vypínací proud – Jistič musí vypnout $1,3 I_n$, resp. I_r do 2 hodin.

2. Chrání proti zkratu – Zkratová spoušť

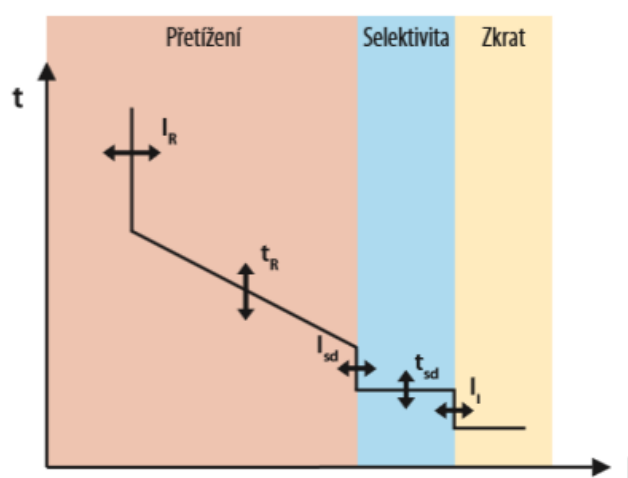
Toto pásmo je také označováno jako nezávislá časová spoušť, protože čas vypnutí není závislý na velikosti proudu. Jakmile hodnota proudu přesáhne nastavenou hodnotu, dojde k okamžitému vybavení jističe, přičemž čas vypnutí je v rozmezí 10 – 30 ms. Hodnotu násobku jmenovitého proudu I_f lze u zkratové spouště nastavit, viz Obr. 3. 11 a tím se přizpůsobit impedanční smyčce nebo umožnit rozběh motoru. [6]

Speciální nadproudové spouště

Dalším typem nadproudových spouští jsou speciální spouště, u kterých je pásmo jištění proti zkratu rozděleno na dvě části, viz Obr. 3. 13. První z nich je část pro zajištění selektivity, neboli k zajištění koordinace mezi pracovními charakteristikami jističů zapojených v sérii tak, aby v případě poruchy reagoval jistič, který je nejbližší poruchy. Jak uvádí [6], je toto pásmo nazýváno nezávislá časová zpožděná spoušť, pro kterou je zaveden parametr I_{sd} . Oproti zkratové spoušti umožňuje selektivní spoušť zpoždění až 1000 ms. Časové zpoždění reprezentuje na Obr. 3. 13 parametr t_{sd} .



Obr. 3. 12 Vypínací charakteristika tepelné a zkratové spouště jističe BC 160 [6]



Obr. 3. 13 Vypínací charakteristika selektivní spouště [6]

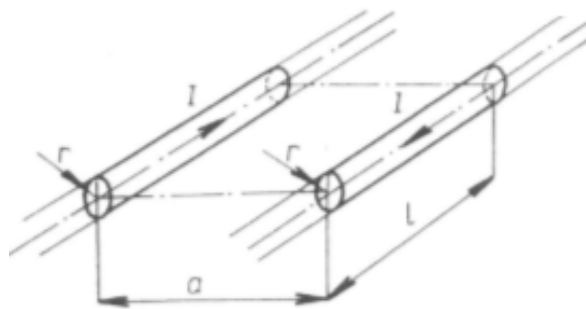
4. Elektrodynamické síly

Proudovodná dráha elektrických přístrojů je namáhána za provozu mechanickými silami vyvolanými proudem, který touto dráhou protéká. Příčinou vzniku sil je magnetické pole, které se vytvoří vlivem procházejícího proudu. Síly vznikají mezi vodiči vždy a to jak v provozních podmínkách, kde jsou síly zanedbatelné, resp. v jednotkách nebo desítkách Newtonů, tak v poruchových stavech kde vlivem velkých proudů dosahují tyto síly i velikosti desítek kilo Newtonů.

Síly mohou mít také neblahý účinek na kontaktní styk, protože můžou zmenšovat kontaktní síly. Toto vede ke zvětšení stykových odporů, zvýšení teploty kontaktů a následně jejich svařením.

Nejobvyklejším případem vzájemné polohy jsou vodiče rovnoběžné. Nacházejí-li se tyto vodiče ve vzájemné blízkosti a protéká-li jimi proud, působí jejich magnetická pole na sebe navzájem. Podle toho, zda vodiči prochází proud se souhlasnou polaritou nebo opačnou, jsou vodiče k sobě přitahovány nebo se naopak odpuzují. [7]

4.1 Síla mezi rovnoběžnými vodiči



Obr. 4. 1 Dva rovnoběžné vodiče [8]

Zákon o zachování energie, jak píše [8], lze formulovat pro elektrický obvod jako energii dodanou zdrojem v čase, která musí být zachována, i když dochází k přeměně v jinou formu. Pak platí

$$dW_e = dW_j + dW_m + dA \quad (1)$$

Kde W_e je energie dodaná zdrojem, W_j energie přeměněná v teplo, W_m přírůstek magnetické energie a A je práce vykonaná silami na úkor přírůstku magnetické energie W_m . Vztah lze přepsat do elektrických veličin a to pro konstantní velikosti proudu

$$U \cdot I \cdot dt = R \cdot I^2 \cdot dt + d\left(\frac{L \cdot I^2}{2}\right) + dA \quad (2)$$

Jelikož se jedná o obecně induktivní obvod, pak podle druhého Kirchhoffova zákona platí

$$U = R \cdot i + \frac{d\Phi}{dt} = R \cdot i + \frac{d}{dt}(L \cdot i) = R \cdot I + I \frac{dL}{dt} \quad (3)$$

Vynásobením rovnice členem $I \cdot dt$ získáme vztah

$$U \cdot I \cdot dt = R \cdot I^2 \cdot dt + I^2 \cdot dL \quad (4)$$

Odečtem této rovnice od získáme

$$dA = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot dL = dW_m \text{ (J)} \quad (5)$$

Ze vztahu (4. 5) je zřejmé, že deformační práce je rovna změně magnetické energie obvodu při konstantním proudu. Pro vyjádření celkové síly je nutno uvažovat, že se při změně polohy elementu vlivem působící síly o dráhu da spotřebuje deformační práce

$$dA = F \cdot da \quad (6)$$

Proto píšeme

$$dA = F \cdot da = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot dL \text{ (J)} \quad (7)$$

Odkud

$$F = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{da} \text{ (N)} \quad (8)$$

Z výše uvedeného vzorce plyne, že elektrodynamická síla není závislá na indukčnosti, nýbrž na její změně a tedy na změně magnetické energie obvodu. Velikost můžeme snadno stanovit pro obvody, ve kterých známe vztahy pro výpočet indukčnosti (viz. Obr. 4. 2). Potom podle [7] píšeme

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 \cdot l}{\pi} \ln \frac{a}{r} \text{ (H)} \quad (9)$$

Vztah (4. 9) platí pro $a \gg r$. Ve vztahu je μ_r – relativní permeabilita, která je pro vzduch a kovy rovna jedné, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (H/m)}$ je permeabilita vakua. Z [7] je zřejmé, že můžeme psát

$$\frac{dL}{da} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} \quad (10)$$

Sílu F mezi rovnoběžnými vodiči udává vztah

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} \cdot I^2 \text{ (N)} \quad (11)$$

Je zřejmé, že ze vztahu vymizel úplně rozměr vodiče. Tato skutečnost však platí pouze pro případ kdy je $a \gg r$, tedy vzdálenost mezi vodiči je mnohonásobně větší než samotný poloměr vodičů. [7]

Pokud jsou tyto dva vodiče protékány různými proudy I_1 a I_2 , bude se, jak je uvedeno v [7], měnit vzájemná indukčnost, ale vlastní indukčnosti zůstanou stejné

$$\frac{dL_1}{da} = \frac{dL_2}{da} = 0; \quad M = \frac{\mu_r \mu_0 \cdot l}{2\pi} \ln \frac{a}{r}; \quad \frac{dM}{da} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} \quad (12, 13, 14)$$

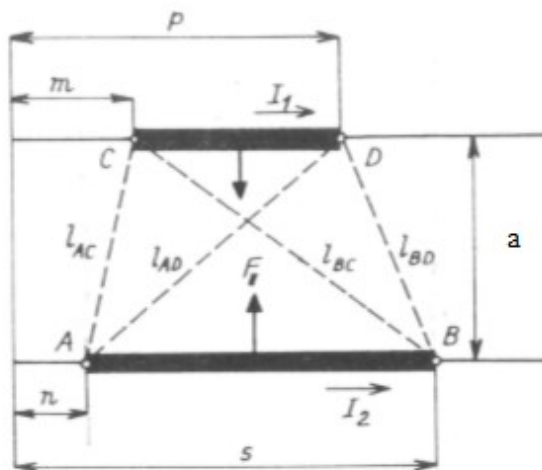
Takže pro sílu mezi dvěma rovnoběžnými vodiči protékajícími dvěma různými proudy můžeme psát

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} I_1 \cdot I_2 \quad (N) \quad (15)$$

Vztah (4. 15) platí jen pro vodiče nekonečně dlouhé a nekonečně tenké. Konečná délka vodičů a průřez mění působící magnetické pole a tím i výslednou sílu jak uvádí [7]. U proudovodných drah přístrojů se vyskytují případy, kdy je délka působícího úseku řádově v jednotkách centimetrů nebo milimetrů, proto je nutné, podle [7] výše uvedený vztah upravit do tvaru

$$\begin{aligned} F &= 10^{-7} I_1 \cdot I_2 \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{p-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{p-s}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{m-s}{a}\right)^2 + 1} \right] = \\ &= 10^{-7} \frac{I_1 \cdot I_2}{a} \cdot \left[\sqrt{(p-n)^2 + a^2} - \sqrt{(p-s)^2 + a^2} - \sqrt{(m-n)^2 + a^2} + \sqrt{(m-s)^2 + a^2} \right] = \\ &= 10^{-7} \frac{I_1 \cdot I_2}{a} \cdot (l_{AD} - l_{BD} - l_{AC} + l_{BC}) = 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{\sum l}{a} \quad (N) \end{aligned} \quad (16)$$

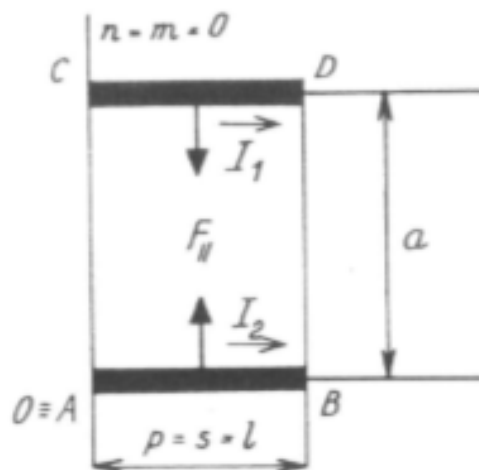
Upravený výraz v závorce představuje součet délek úhlopříček **AD** a **BC** lichoběžníku vymezeného uvažovanými úseky proudovodné dráhy **AB** a **CD**, zmenšený o součet délek odvěsen **AC** a **BD**. Proto je možné určit působící sílu změřením příslušných délek, které jsou patrné z Obr. 4. 2. [7]



Obr. 4. 2 Rozložení vodičů [7]

V [7] je uveden tzv. činitel k_d , který je má hodnotu $k_d < 1$, který má pro různá uspořádání vodičů omezené délky různá znění. Například pro vodiče na Obr. 4. 3 je činitel k_d

$$k_d = \sqrt{\left(\frac{a}{l}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l} \quad (17)$$



Obr. 4. 3 Uspořádání vodičů pro činitel k_d [7]

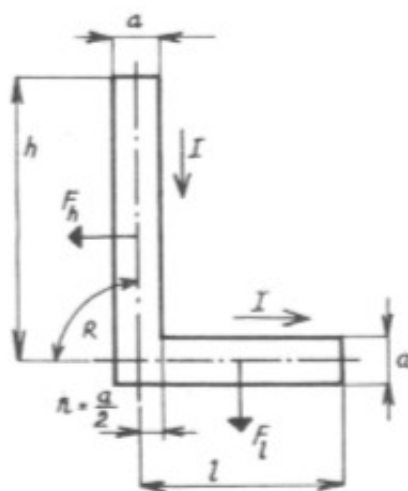
Dosazením odpovídajících vztahů, jak je uvedeno v [7], získáme následný vztah pro síly mezi rovnoběžnými vodiči

$$F = 10^{-7} \cdot I_1 I_2 \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{l}{a}\right)^2 + 1} - 1 - 1 + \sqrt{\left(\frac{l}{a}\right)^2 + 1} \right] = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} \cdot I_1 I_2 \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right] =$$

$$= 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} \cdot I_1 I_2 \cdot k_d \text{ (N)} \quad (18)$$

4.2 Síly mezi vodiči v úhlu

Pravoúhlý záhyb



Obr. 4. 4 Pravoúhlý záhyb [4]

U přístrojů se jedná o hojně používaný tvar úseků proudovodných drah. Pravoúhlý záhyb je zobrazen na Obr. 4. 4. Podle [7] jsou síly a momenty sil působící na pravoúhlý záhyb ve tvaru

$$F_l = 10^{-7} I^2 \cdot \ln \frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} (N) \quad (19)$$

$$M_l = 10^{-7} I^2 \cdot h \cdot \ln \cdot \frac{l + \sqrt{h^2 + l^2}}{\frac{a}{2} + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}} (N \cdot m) \quad (20)$$

$$F_h = 10^{-7} I^2 \cdot \ln \frac{2h}{a} \cdot \frac{l + \sqrt{l^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{l + \sqrt{l^2 + h^2}} (N) \quad (21)$$

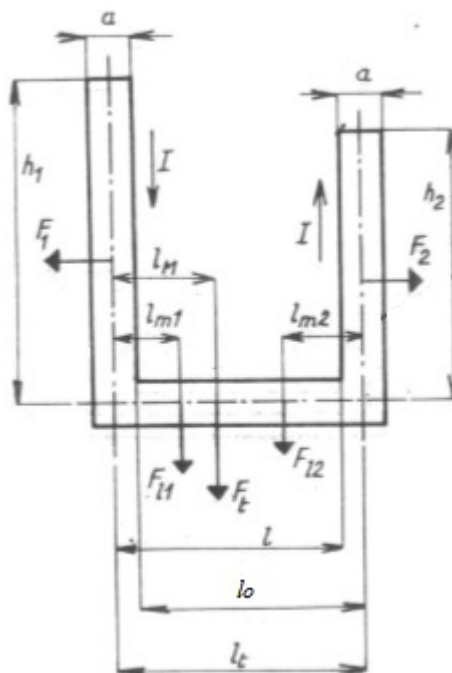
$$M_h = 10^{-7} I^2 \cdot l \cdot \ln \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + l^2}}{\frac{a}{2} + \sqrt{l^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}} (N \cdot m) \quad (22)$$

Složený pravoúhlý záhyb

V praxi se často používá část proudovodné dráhy ve tvaru pravoúhlé U smyčky, zobrazenou na Obr. 24. Pokud se bude jednat o symetrický útvar, bude se působíště síly nacházet uprostřed osové vzdálenosti l_o obou přívodů a výsledná síla pak bude ve tvaru

$$F_t = 2 \cdot 10^{-7} I^2 \cdot \ln \frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} (N) \quad (23)$$

Jestli naopak bude délka přívodů rozdílná (viz. Obr. 4. 5), potom je nutné počítat sílu pro každý pravoúhlý záhyb zvlášť a výslednou elektrodynamickou sílu určit jako jejich součet. Působíště elektrodynamické síly již neleží v polovině osové vzdálenosti l_o , ale přesouvá se k delšímu přívodu. Vzdálenost působíště l_p osy zvoleného přívodu určíme pomocí vzorce pro ohybový moment a na základě rovnosti momentů. [7]



Obr. 4. 5 Složený pravouhlý záhyb [4]

4.3 Síla působící v kontaktní úžině

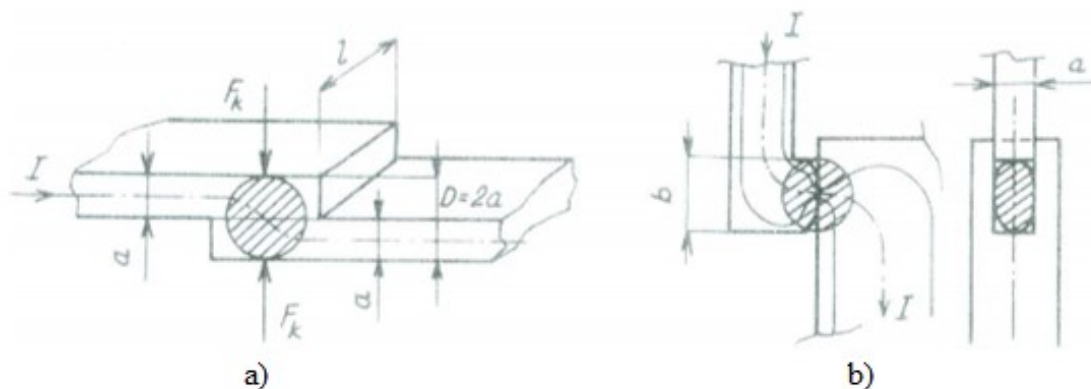
Vlivem zakřivení proudnic v kontaktní úžině vznikne mezi kontakty, kterými prochází proud, elektrodynamická síla působící proti kontaktnímu tlaku. Pokud tato síla překročí velikost síly kontaktního tlaku, dojde k nadskočení kontaktů vlivem této síly. Po nadskočení kontaktů se mezi nimi zapálí elektrický oblouk a po zpětném dosednutí pohyblivých kontaktů dojde k jejich svaření. V případě, že je síla vypínací pružiny dostatečně velká, nastane oddálení svařených kontaktů a zároveň vytržení kontaktního materiálu obou kontaktů, což vede k degradaci a snížení životnosti přístroje. Pokud však síla není dostatečně velká, aby mohla odtrhnout kontakty od sebe, dojde k selhání funkce přístroje. Sílu působící v kontaktní úžině lze vypočítat podle vztahu (24).

$$F_U = 10^{-7} I^2 \cdot \ln \frac{D}{d} \text{ (N)} \quad (24)$$

V uvedeném vztahu (24) značí d průměr kruhové stykové plošky určené kontaktním přitlakem F_K a pevností v tlaku materiálu kontaktu H , jak uvádí [7]. Vztah pro průměr plošky d píšeme ve tvaru

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_K}{\pi \cdot H}} \text{ (m)} \quad (25)$$

Ve vztahu (24), reprezentuje parametr D průměr idealizované konečné hladiny proudovodné úžiny. Tato hodnota představuje nejmenší rozměr kontaktního dílce v místě styku. V případě kontaktního styku zobrazeném na Obr. 4. 6 a), je nejmenší rozměr kontaktního dílce roven výšce pásu a , pak bude průměr $D = 2a$. [7]



Obr. 4. 6 Příkladů kontaktních úžin [7]

V případě kontaktního styku na Obr. 4. 6 b), kdy je průřez kontaktního dílce obdélníkový má, podle [7] konečná hladina tvar půlelipsoidu s osami základny **a**, **b**. Ve výpočtu je nutné pro zjednodušení nahradit půlelipsoidu polokoulí, s přibližným průměrem

$$D = \sqrt{a \cdot b} \text{ (m)} \quad (26)$$

4.4 Minimální kontaktní tlak

Pro výpočet minimálního kontaktního tlaku je nutné vypočítat, podle vztahu (27), stykový odpor na mezi svaření.

$$R_s \approx \frac{U_{Svař}}{C_k \cdot I_k} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (27)$$

Ve vztahu pro stykový odpor na mezi svaření je podle [7], $U_{Svař}$ (V) napětí svaření, I_k (A) zkratový proud a C_k poměr měrného odporu kontaktní úžiny.

Dle [7] stanovíme minimální kontaktní tlak ze vztahu (28)

$$F_{k \min} \geq \left(\frac{k}{R_s} \right)^{\frac{1}{n}} \text{ (N)} \quad (28)$$

Ve výše uvedeném vztahu značí **k** materiálovou konstantu, přičemž platí, že se dolní mez intervalu vztahuje na kontakty v ochranném prostředí nebo na kontakty, které se pravidelným smykovým spínacím procesem čistí. Horní mez intervalu platí pro čelní kontakty, které se nacházejí v agresivním prostředí, nebo kontakty jen občasné spínané. V Tab. 4. 1 jsou uvedeny hodnoty materiálových konstant kontaktních materiálů. [7]

Tab. 4. 1 Hodnoty materiálových konstant pro vybrané kontaktní materiály [7]

Materiál kontaktů	k
Stříbro - stříbro	$3 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-4}$
Měď - měď	$6 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$
Hliník - hliník	$9 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$
Měď - hliník	$5 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-2}$

Exponent n ve vztahu (28) určuje druh kontaktního styku. Pro bodový styk a pro čelní kontakty v přímkovém dotyku má hodnotu 0,5, při přímkovém styku třecích kontaktů volíme z intervalu 0,7 – 0,8, přičemž pro tvrdý kontaktní materiál volíme hodnotu vyšší. Pokud se jedná o plošný kontaktní styk (např. šroubové svorky a spoje), nabývá exponent n hodnoty 1.

4.5 Síly působící na vodič v blízkosti feromagnetika

Je-li proudovodná dráha v blízkosti prvku z feromagnetického materiálu o permeabilitě μ , potom vzniká při průchodu proudu mezi tělesem a vodičem přitažlivá síla. Tohoto jevu je hojně využíváno ve zhášedlech magnetických vypínačů s kovovými komorami. Plazmatický sloupec elektrického oblouku tvoří pohyblivou proudovodnou dráhu mezi oddalujícími se kontakty. Pokud se oblouk přiblíží ke zpravidla ocelovému roštu zhášecí komory, pak je vlivem vznikajících sil do komory vtažen.

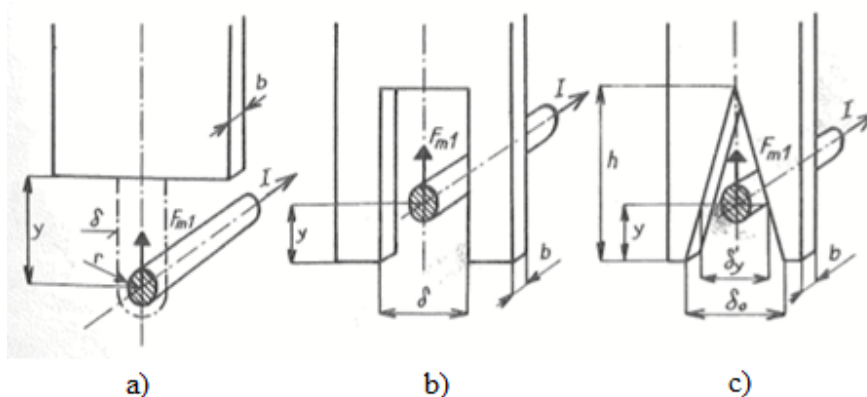
Velikost síly působící na elektrický oblouk v blízkosti feromagnetika lze určit podle [8] uvažováním magnetické energie soustavy. Velikost elementu magnetického toku $d\Phi$ určíme ze vztahu (29)

$$d\Phi = I \cdot dG_m = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{b \cdot dy}{\delta} \quad (Wb) \quad (29)$$

Kde I je proud budící elementární magnetický tok ve vzduchu na dráze δ o magnetické vodivosti G_m při průřezu magnetické trubice $b \cdot dy$. Pak je výsledná síla rovna

$$F_m = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} I^2 \frac{b}{\delta} \quad (N) \quad (30)$$

Tento vztah je odvozen při ideálních podmínkách a bez uvažování rozptylu magnetického pole.



Obr. 4. 7 Umístění elektrického oblouku v blízkosti desky roštové komory [8]

Pokud je elektrický oblouk podle Obr. 4. 7 a) pod vstupní hranou roštové lamely ve vzdálenosti y , potom je nejkratší dráha magnetické siločáry vzduchem mezi obloukem a deskou

$$\delta = 2 \cdot y + \pi \cdot r \text{ (m)} \quad (31)$$

Pak vztah pro sílu působící na jednu desku, jak je uvedeno v [8], bude ve tvaru

$$F_{m1} = 2 \cdot 10^{-7} I^2 \frac{b}{2 \cdot y + \pi \cdot r} \text{ (N)} \quad (32)$$

Pro případ uvedený na Obr. 4. 7 b), tedy pro desku s obdélníkovým výřezem, platí pro sílu vztah

$$F_{m1} = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} I^2 \frac{b}{\delta} \text{ (N)} \quad (33)$$

Pokud je výřez ve tvaru klínu (Obr. 4. 7 c), potom se podle [8] zkracuje délka vzduchové dráhy magnetického toku $\delta_y = \delta_0 (1 - y/h)$ úměrně hloubce vniku y oblouku do výřezu, poté vztah pro element magnetického toku $d\Phi$ platí

$$d\Phi = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{b \cdot dy}{\delta_y} = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{b \cdot h}{\delta_0 \cdot (h - y)} \text{ (Wb)} \quad (34)$$

A konečně síla působící na elektrický oblouk

$$F_{m1} = 2 \cdot 10^{-7} I^2 \frac{b \cdot h}{\delta_0 \cdot (h - y)} \text{ (N)} \quad (35)$$

Síla vtahující elektrický oblouk do roštu magnetické komory je při n počtu deskách roštu n – krát větší, ale jak uvádí [8], nenarůstá do nekonečných hodnot, protože v sérii s magnetickým odporem vzduchové dráhy je magnetický odpor dráhy v železe.

5. Možnosti realizace práce

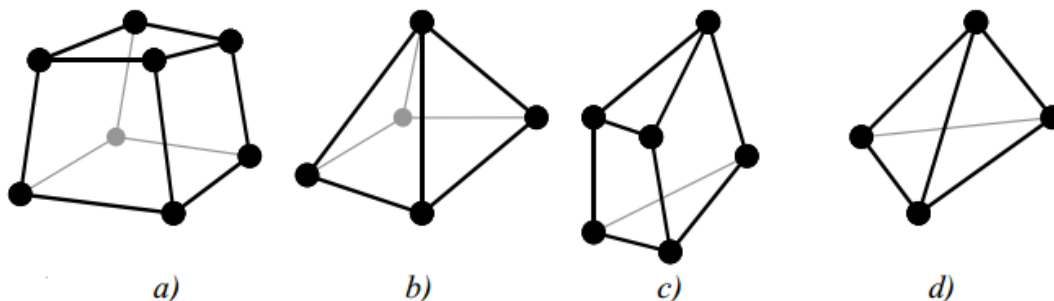
5.1 Analytická (klasická) metoda

Analytická metoda spočívá v řešení problému pomocí prostředků matematické analýzy, například pomocí vztahů uvedených v kapitole 4. Pomocí klasické metody lze silové účinky řešit za zjednodušujících podmínek a to pouze pro prvky se specifickou geometrií a rozložením proudovodných drah. Vztahy pro tento výpočet (viz kapitola 4.), vycházejí z Maxwellových rovnic popisujících zákony elektromagnetického pole. Poté jsou tyto vztahy dále odvozovány pomocí postupů, které vychází z Biot – Savartova zákona a z energetické bilance soustavy. Postupy lze aplikovat jen pro případ, kdy jsme schopni najít vztah pro magnetickou indukci v každém bodě vodiče, kterým prochází proud (řešení pomocí Biot – Savartova zákona), případně pokud lze najít vztah pro vlastní a vzájemné indukčnosti obvodů vyjádřené geometrickými parametry obvodů. V ostatních případech, kdy výše uvedené podmínky nelze splnit, analytické vztahy neexistují nebo je řešení problému pracné a zdoluhavé. Z této skutečnosti vyplývá nevýhoda analytické metody, která spočívá v časové náročnosti a nutnosti matematických znalostí na vysoké úrovni. [11]

5.2 Metoda konečných prvků (MKP)

Metoda konečných prvků MKP (Finite element method – FEM), jak uvádí [9] je numerická metoda, která slouží k řešení rozsáhlé škály inženýrských problémů pomocí jeho fyzikálního modelu. Metoda vznikla v 50. letech 20. století pro potřeby konstruktérů v leteckém, kosmickém, jaderném a vojenském průmyslu, odkud se rozšířila do dalších odvětví, ale její rozvoj nastal až s rozvojem výpočetní techniky.

Metoda byla rozšířena díky variační formulaci z řešení pružnosti a dynamiky na řešení proudění kapalin a plynů, vedení tepla, záření, elektromagnetismus, akustiku apod. MKP je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro nalezení kritických míst konstrukce. Z názvu metody je zřejmé, že základním kamenem je prvek s konečnými rozměry. MKP vyžaduje rozdělení kontinua na konečný počet podoblastí neboli prvků. Pro každý prvek je kromě rozměru a tvaru charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Tyto uzly jsou v podstatě body sítě, v nichž hledáme parametry řešení. Hustota a topologie prvků sítě ovlivňuje kvalitu výsledků a potřebnou kapacitu pro řešení.



Obr. 5. 1 Možné tvary prvků [9]

Výhodou numerických metod oproti analytickým metodám je, že lze s jejich pomocí řešit složité konstrukční prvky, simulaci jevů a dějů, které by se v praxi uskutečňovaly velmi obtížně, nebo by s ohledem na destrukci zařízení při zkouškách byly příliš nákladné.

Nevýhoda oproti analytickým metodám spočívá ve výsledku řešení, respektive v počtu bodů řešení. Při řešení dané problematiky pomocí analytické metody získáme závislost mezi vstupními a výstupními veličinami v nekonečném počtu bodů, zatímco u MKP dosáhneme konečného počtu bodů, proto při jakékoliv změně vstupních parametrů je nutné výpočet opakovat.

Faktické omezení MKP spočívá v dostupném výpočetním výkonu a časové náročnosti při řešení složitých konstrukcí. Výsledek obdrženy od MKP se vztahuje pouze na konkrétní zadaný případ. Při optimalizaci nebo jakékoli úpravě je nutno, jak je uvedeno výše, výpočet opakovat. Pro simulaci fyzikálních jevů a dějů existuje v současné době velká řada software, například ANSYS Maxwell využívající pro svou činnost metodu konečných prvků. [9]

Metoda konečných prvků je zpravidla rozdělena do tří částí:

1) Pre – processing

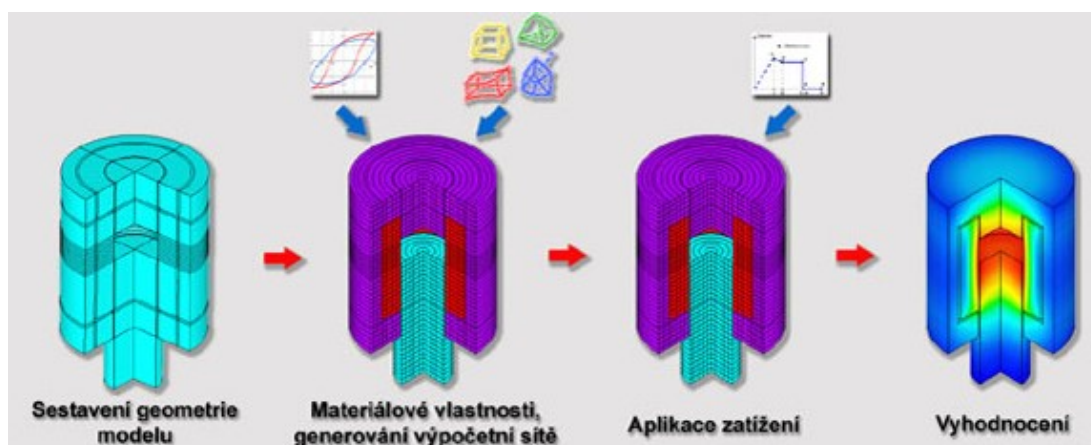
V této etapě dochází k vytváření modelu a jeho geometrie, volbě materiálových vlastností, vytvoření výpočetní sítě, zadání okrajových podmínek a specifikování zatížení (např. úbytek napětí, apod.). Modely lze realizovat ve 1D, 2D nebo 3D. [11]

2) Solution

V části řešení je zvolen typ analýzy (statická, harmonická, transientní), výběr řešení pro dané fyzikální pole a nastavení požadované přesnosti. Podle typu analýzy se pak volí výpočetní časy či frekvence, způsob zápisu a tisku výsledků atd. Ve většině výpočetních programů je tato část plně automatizována. [11]

3) Post – processing

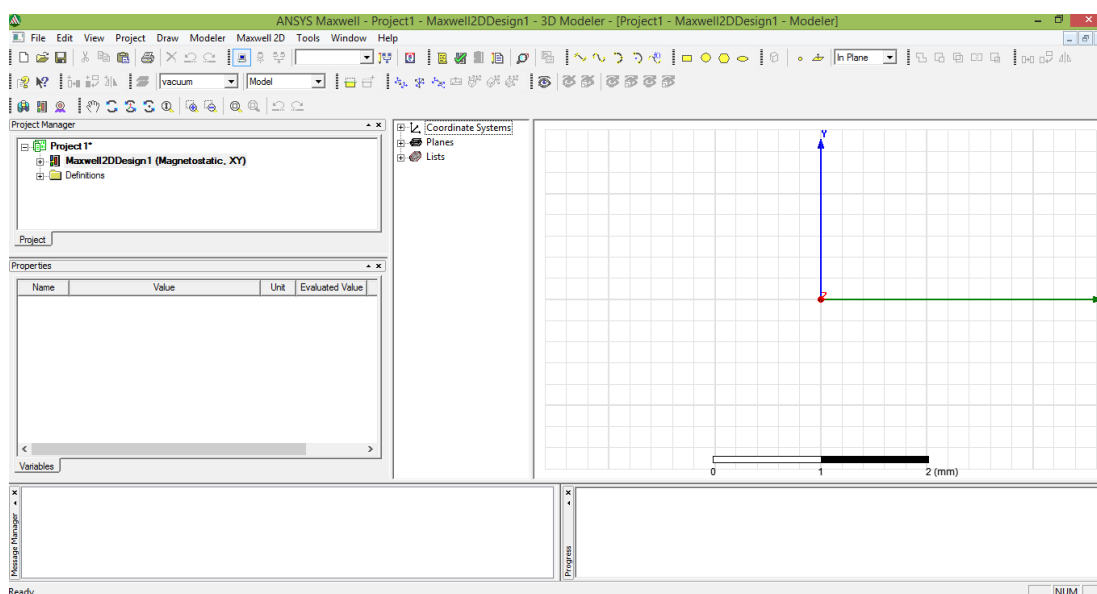
V závěrečné etapě dochází k vyhodnocení řešení daného problému. Pro názornost je k dispozici možnost grafické interpretace dosažených výsledků (viz. Obr. 5.2). [11]



Obr. 5. 2 Postup řešení pomocí numerických metod [11]

5.3 ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell je přední software pro simulování elektromagnetických polí pro inženýry, jejichž úkolem je návrh a analýza elektromagnetických nebo elektromechanických zařízení, například motorů, pohonů, transformátorů, snímačů a cívek. Maxwell používá metody konečných prvků pro řešení statických, frekvenčních a časově proměnných elektromagnetických a elektrických polí. Hlavním přínosem programu je jeho samostatný proces řešení, pro který je nutno zadat jen geometrii prvku, materiálové vlastnosti a požadovaný výkon. Od tohoto okamžiku Maxwell sám vytváří vhodnou, účinnou a přesnou síť pro řešení daného problému. Tento samočinný, přizpůsobivý síťovací proces odstraňuje komplexnost z analyzačního procesu a umožňuje využít vysoce efektivní návrh toku. Klíčovým prvkem v ANSYS Maxwell je schopnost generovat vysoce věrné, redukované pořadí modelů z řešení metody konečných prvků pro použití v ANSYS Simplorer - simulační, multi – oborový systém od ANSYS. [10]



Obr. 5. 3 Pracovní prostředí ANSYS Maxwell

6. Výpočet sil v kontaktní úžině jističe BC 160

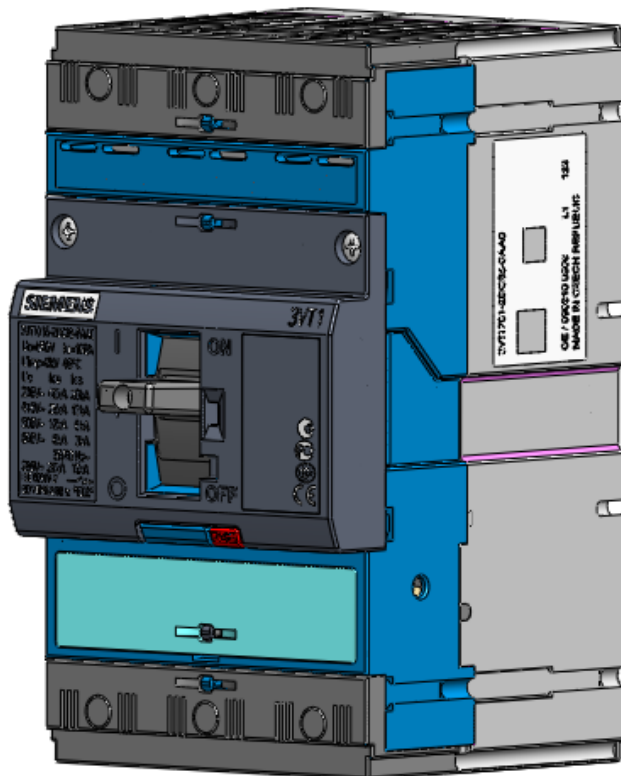
6.1 Specifikace zadání práce

V této části práce bude proveden výpočet síly působící v kontaktní úžině jističe BC 160 na předem vytvořeném jednopólovém 3D modelu proudovodné dráhy. Výpočet sil bude proveden pomocí dvou metod. V prvním případě je kontaktní styk, respektive kontaktní ploška vytvořena na základě teoretických poznatků a vztahů. Druhá metoda vychází z pozorování kontaktní plochy pomocí mikroskopu. Na tomto základě je vytvořen model kontaktního styku vycházející z reálného kontaktního styku.

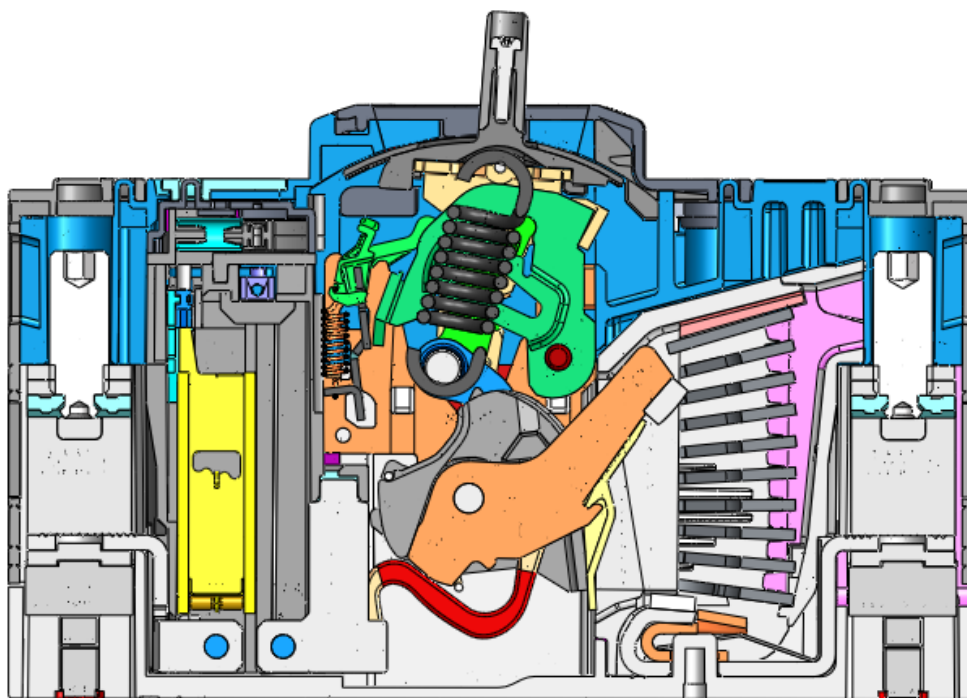
U obou metod byly zadány proudy **2,6**; **13** a **25 kA**, pro které budou vypočteny síly působící v kontaktní úžině jističe BC 160. Hodnota proudu **2,6 kA** byla zvolena zadavatelem z důvodu opakovaného nadskočení kontaktů různých kusů jističe BC 160 při této velikosti proudu. Hodnoty proudů **13** a **25 kA** byly zvoleny, protože hodnota proudu **25 kA** je efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu (I_{CU}) a **13 kA** je hodnota předpokládaného vypínacího proudu v **kA**, která odpovídá jednomu z určených procent jmenovité mezní zkratové vypínací schopnosti (I_{CS}), a může být vyjádřena jako procentní hodnota z I_{CU} (viz. Obr. 3. 3). Pro zadané proudy lze tedy psát $I_{CS} = 50\%I_{CU}$. Dalším cílem výpočtů bude nalézt pro každou metodu proud, při kterém dojde k nadskočení kontaktů jističe BC 160.

6.2 Realizace 3D modelu proudovodné dráhy jističe BC 160

Práce v programu SolidWorks



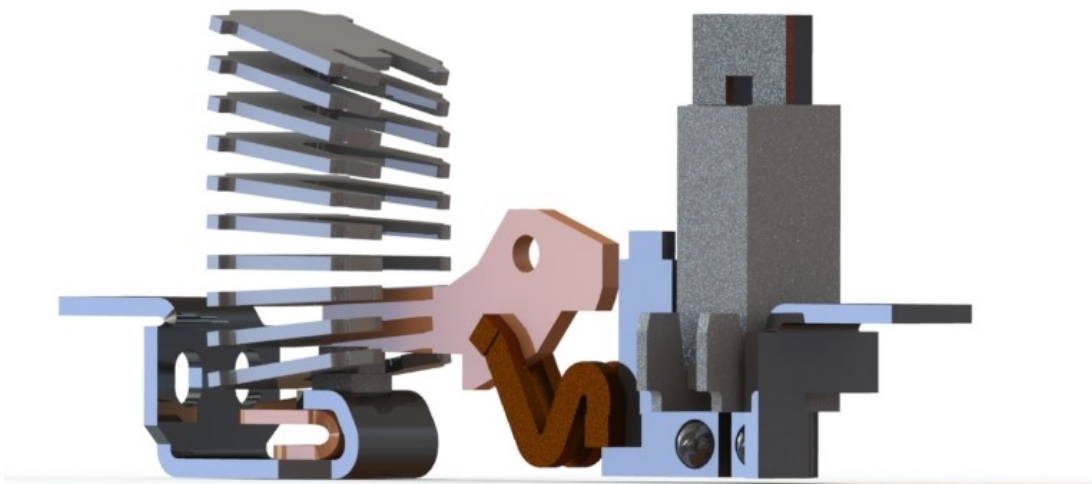
Obr. 6. 1 Počítačový 3D model jističe BC 160 (3VT1)



Obr. 6. 2 Řez 3D modelem

Pro realizaci zadání je nutné vytvořit 3D počítačový model. Model lze sestavit přímo v programu ANSYS Maxwell (viz kap. 5. 3). Tato možnost je však velice pracná, protože jeho prostředí pro modelování nemá rozsáhlou škálu nástrojů jako programy, které jsou přímo určeny k 3D modelování. Tento problém řeší možnost importu modelů z programů, v kterých byly vytvořeny. Pro tvorbu počítačového 3D modelu byl zvolen program SolidWorks.

Geometrie modelu byla převzata z technické dokumentace poskytnuté výrobcem jističe, pro získání doplňujících rozměrů byl jistič rozebrán (viz. Obr. 3. 10) a následně díly změřeny posuvným měřítkem. Poté byly všechny rozměry přeneseny do programu SolidWorks, kde byl model zhotoven. Hotový model je zobrazen na Obr. 6. 3.

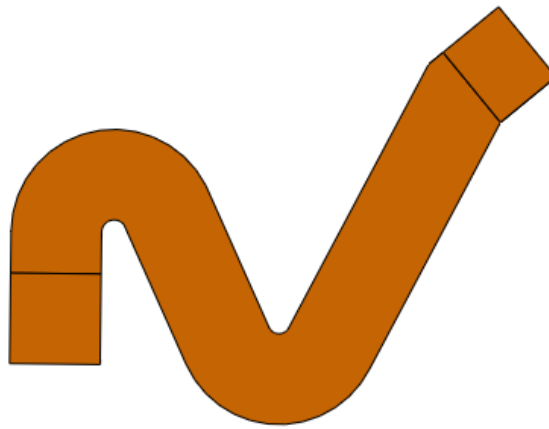


Obr. 6. 3 Jednopolový 3D model proudovodné dráhy jističe BC 160

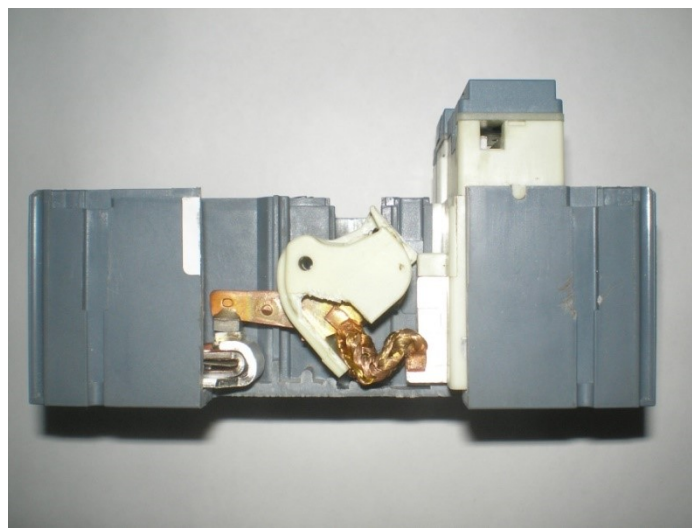
Z Obr. 6. 3 je zřejmé, že jednotlivé díly jsou zpracovány jako jednoduché prvky s co nejmenším počtem zaoblených hran. Důvodem tohoto zjednodušení je výpočetní síť v programu ANSYS Maxwell, respektive se sníží počet prvků v síti, jinak by výpočet trval delší dobu a byl by náročnější z hlediska hardwarových požadavků. S jednoduchou geometrií byl zhotoven i lankový vodič (flexopas) zobrazený na Obr. 6. 4 a 6. 5. Skutečný pohyblivý vodič je vyroben z mnoha tenkých měděných vláken, které se jen stěží dají modelovat, proto bylo nutné jeho podobu zjednodušit. Tvar modelovaného flexopasu přibližně odpovídá tvaru reálného flexopasu při sepnutých kontaktech jističe, jak je zobrazeno na Obr. 6. 5 a 6. 6.



Obr. 6. 4 Pohyblivý vodič



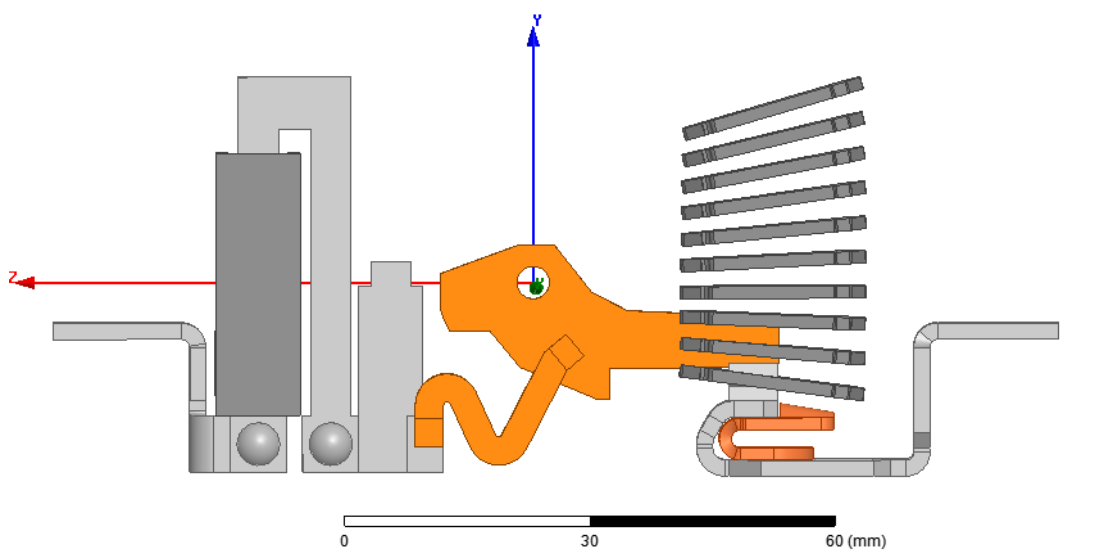
Obr. 6. 5 Modelovaný flexopas



Obr. 6. 6 Tvar flexopasu při sepnutých kontaktech

Práce v programu ANSYS Maxwell

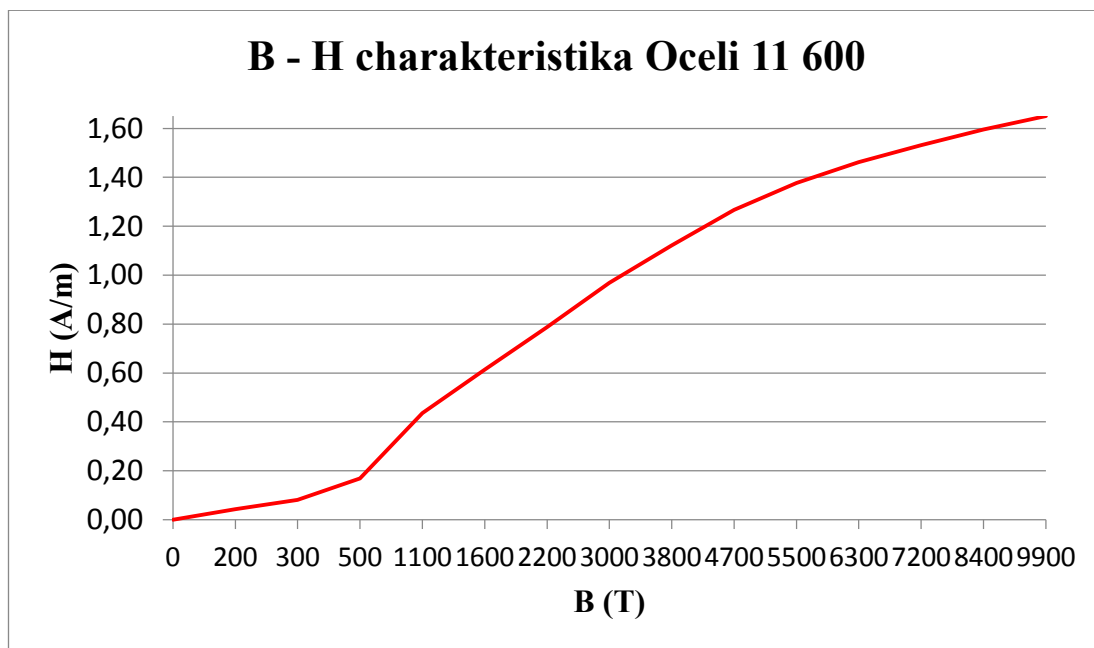
Takto vytvořený počítačový model byl uložen ve formátu Parasolid.x_t a následně importován do programu ANSYS Maxwell (Obr. 6. 7), pomocí příkazu *Import* v záložce *Modeler*, ve kterém byla předtím jako typ úlohy zvolena statická 3D úloha. Po importu geometrie modelu byl každému prvku v modelu přiřazen materiál z knihovny materiálů v programu. V modelu jsou zastoupeny 3 typy materiálů – měď pro přívodný a odvodný pás, topný vodič a pás, který je spojen měděnými flexopasy s pohyblivým palcem kontaktu; stříbro jako kontaktní materiál a jako magnetický materiál (nelineární prvek), který je přiřazen ke dvojkovu, opalovacímu pásu a lamelám zhášecí komory, ocel 11 600. B – H charakteristika oceli 11 600 je uvedena v na Obr. 6. 8, hodnoty B – H charakteristiky v Tab. 6. 1.



Obr. 6. 7 3D model importovaný do programu ANSYS Maxwell

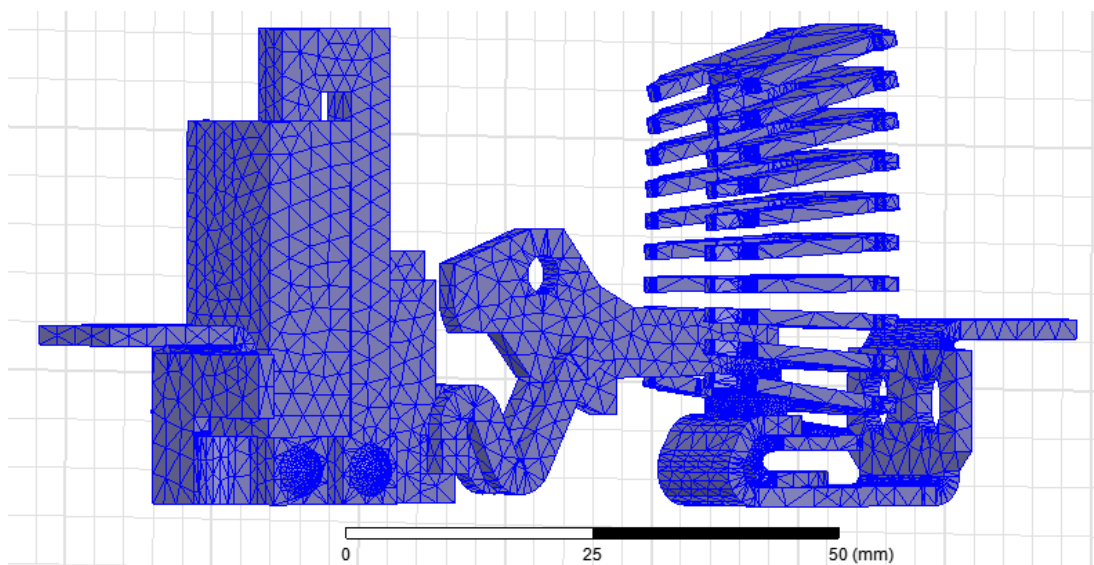
Tab. 6. 1 Hodnoty B – H charakteristiky oceli 11 600

H (A/m)	B (T)
0	0
200	0,0428
300	0,0815
500	0,1692
1100	0,4361
1600	0,6139
2200	0,7873
3000	0,9682
3800	1,1223
4700	1,2672
5500	1,3769
6300	1,4623
7200	1,5315
8400	1,5954
9900	1,6504

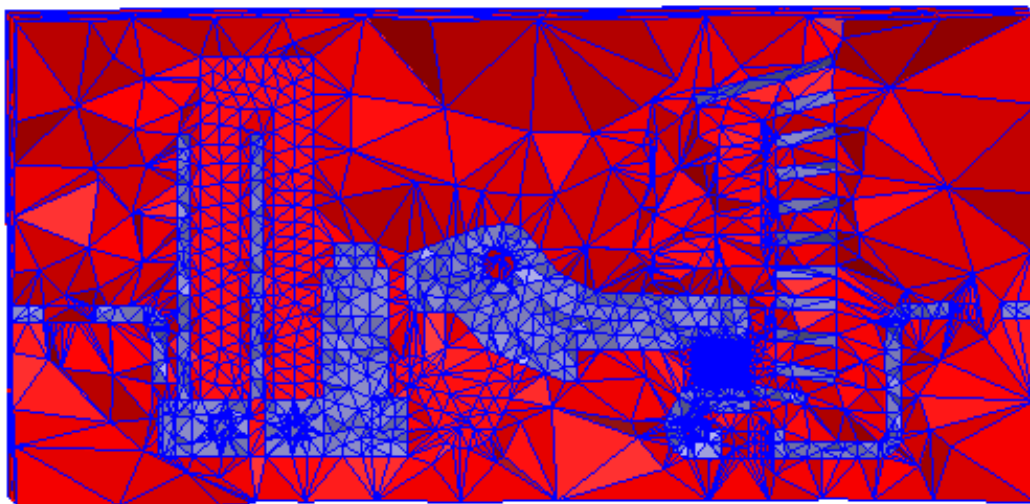


Obr. 6. 8 B - H charakteristika Oceli 11 600

Po přiřazení materiálů k prvkům bylo nastaveno řešení úlohy a pak celý model vysítován pomocí příkazů *Assign mesh operation* a *Apply mesh operations*. Stanovení vhodné velikosti výpočtové sítě je velice důležité, protože její nedostatečná velikost v kritických místech může způsobit chybu výpočtu. V opačném případě velká hustota sítě v místech, kde není potřebná, zvýší výpočtové nároky a čas, aniž by došlo ke zpřesnění výsledků. Maximální velikost elementu tedy byla omezena na **3,5 mm** pro všechny součásti v modelu proudovodné dráhy, vyjma kontaktů, kde byla stanovena maximální velikost síťového prvku na **0,6 mm**. Takto vysítovaný model je zobrazen na Obr. 6. 9.

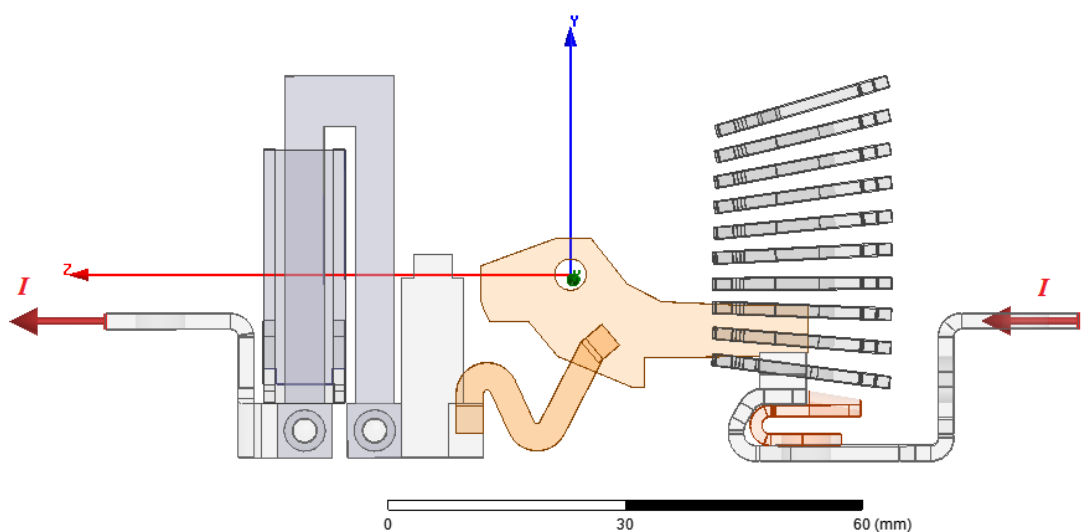


Obr. 6. 9 Vysítovaný 3D model proudovodné dráhy jističe BC 160



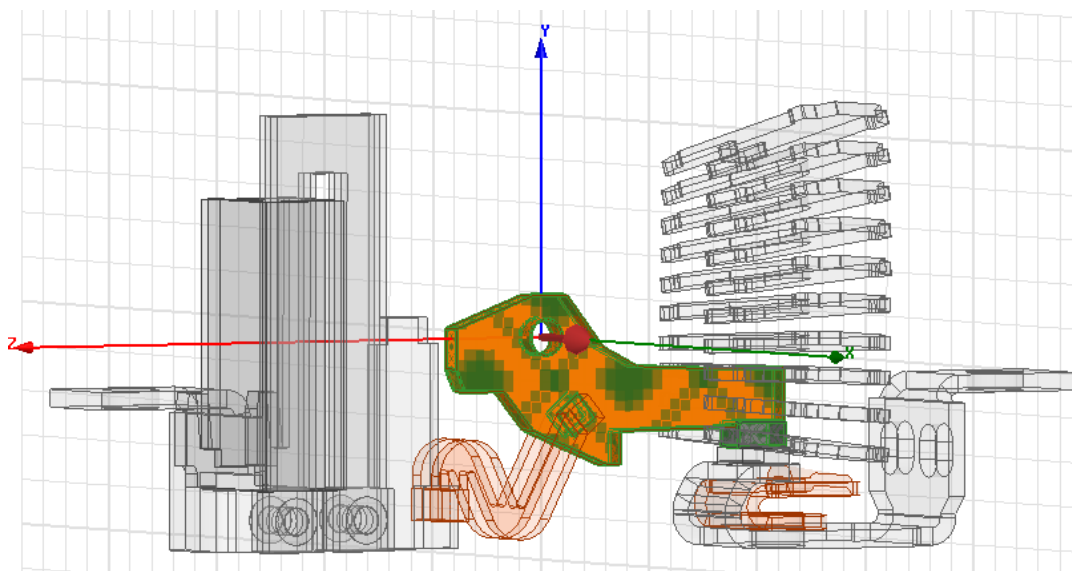
Obr. 6. 10 Vysítované okolí 3D modelu

Dalším krokem v programu ANSYS Maxwell bylo zadání proudu tekoucího proudovodnou dráhou. Pro tuto operaci je v programu příkaz *Assign excitation*. Po otevření podokna příkazu byla vybrána možnost *Current*. Model se zobrazeným směrem proudu je znázorněn na Obr. 6. 11.



Obr. 6. 11 Směr toku proudu v 3D modelu proudovodné dráhy

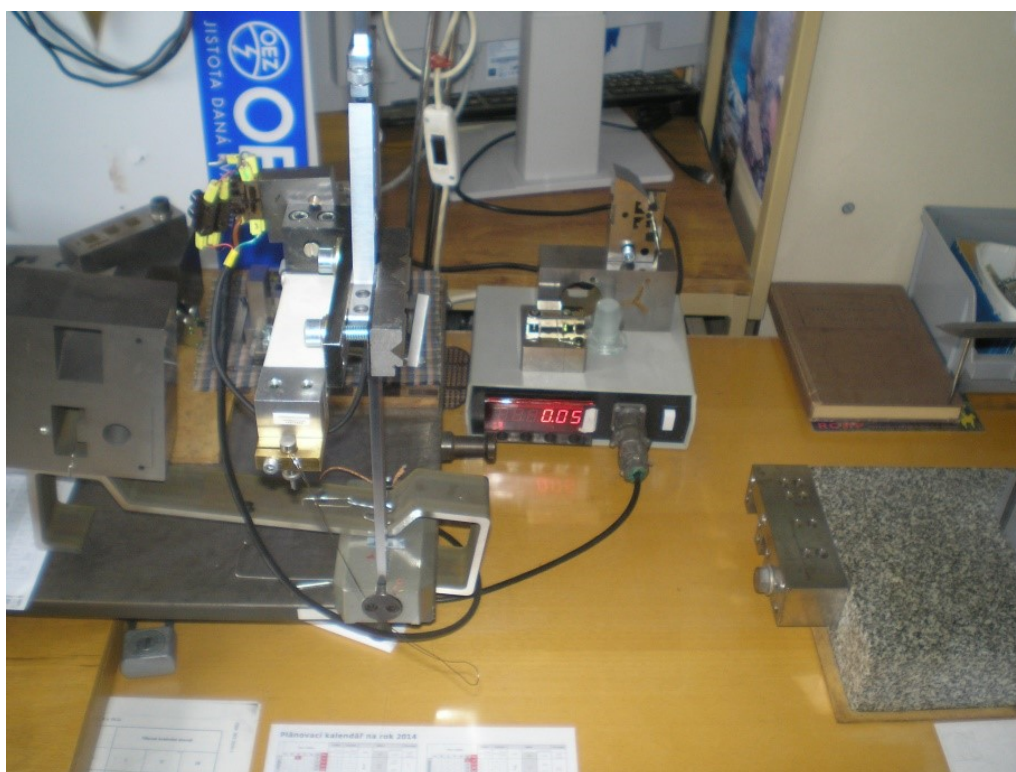
Pro výpočet síly v kontaktní úžině je nutné zadat jako výpočtový parametr moment síly (pomocí příkazu *Assign parameters*) působící na pohyblivý kontakt a palec kontaktu. Aby mohl být výpočet proveden, bylo nutné vytvořit vztažný souřadný systém umístěný v otvoru čepu palce kontaktu. Protože model proudovodné dráhy jističe leží podélně v ose Z (viz. Obr. 6. 7), byla zvolena osa X jako osa otáčení (viz. Obr. 6. 12).



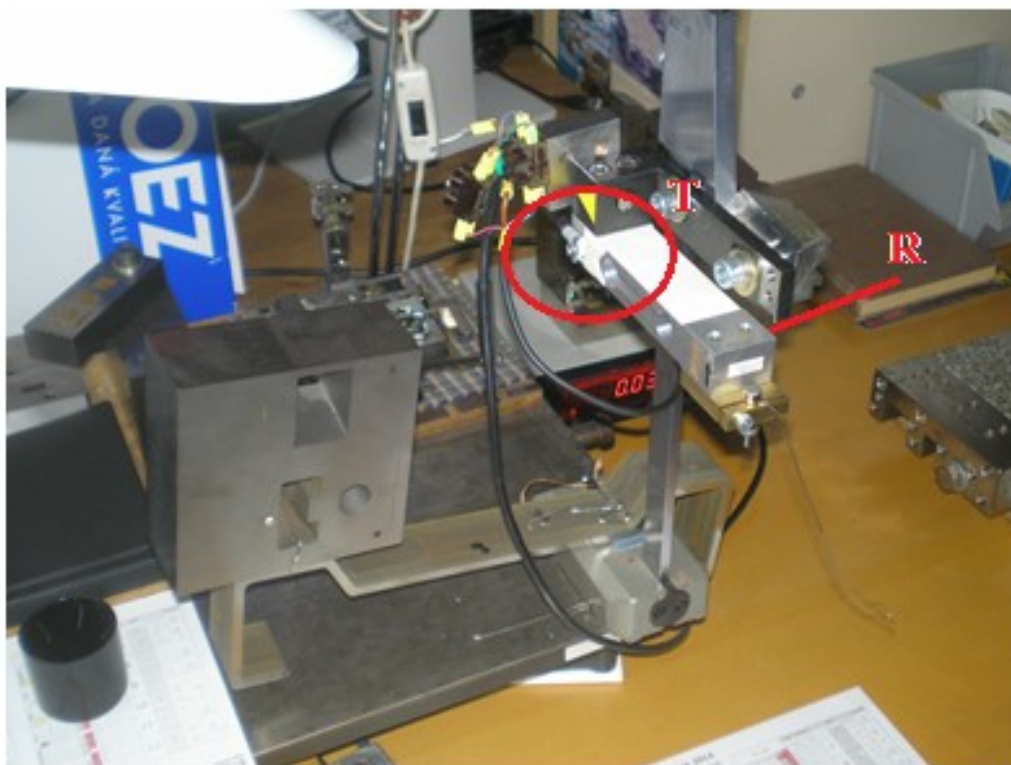
Obr. 6. 12 Vztažný souřadný systém momentu síly

6.3 Měření kontaktního tlaku jističe BC 160

Aby bylo možné zjistit proud, při kterém dochází k nadskočení kontaktů, je nutné provést měření kontaktního tlaku jističe BC 160.

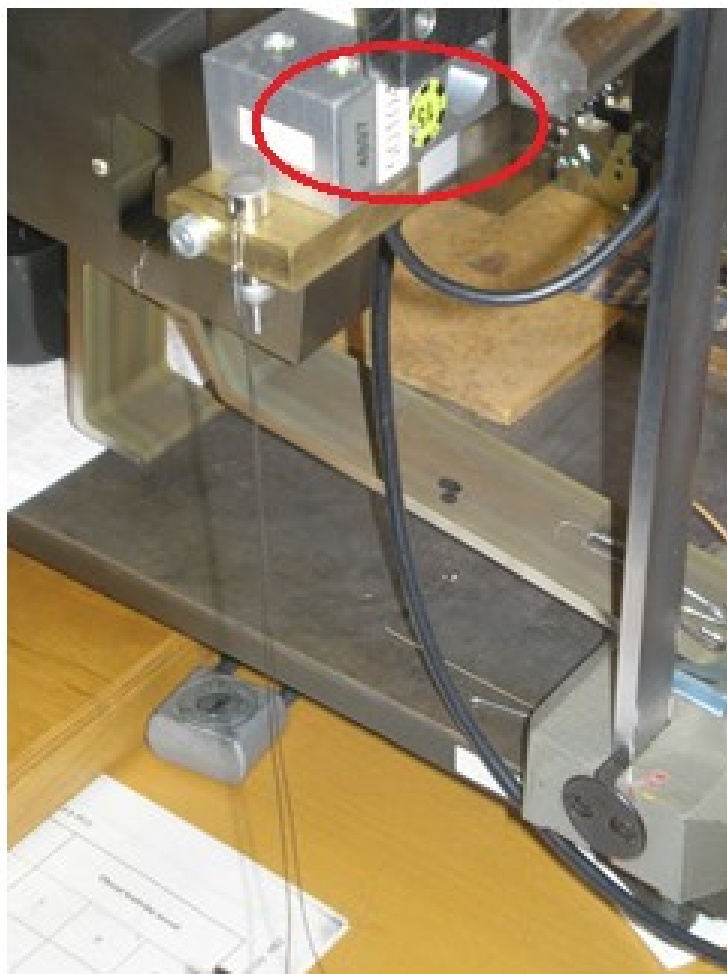


Obr. 6. 13 Měřicí soustava



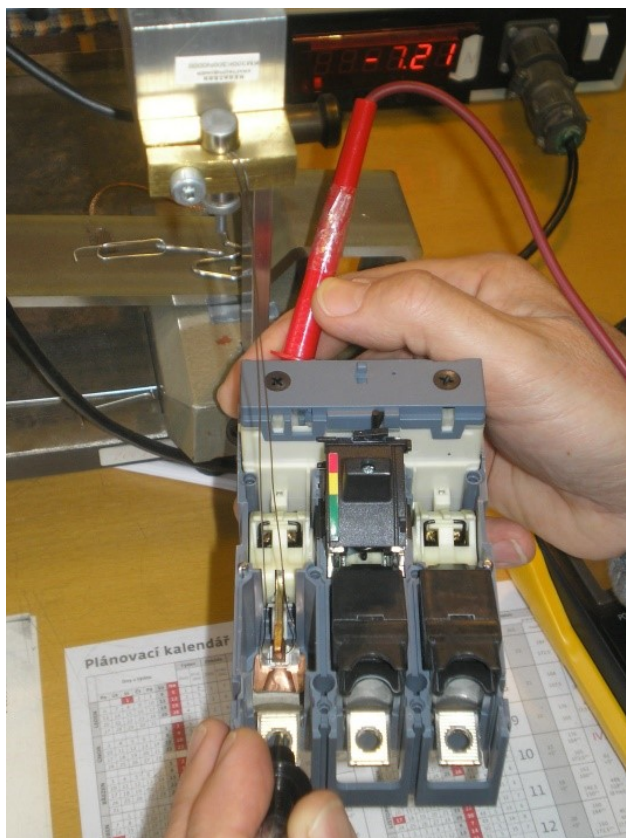
Obr. 6. 14 Tenzometr připevněný k ramenu soustavy

Měřicí soustava je tvořena měřícím ramenem s připevněným tenzometrem (Obr. 6. 13), který měří mechanické napětí na povrchu měřícího ramene vyvolané tahem drátu, připevněným ke kontaktnímu systému jističe BC 160. Ke snímání mechanického napětí je připojen A/D převodník s displejem, na kterém je zobrazena výsledná hodnota síly. Je třeba poznamenat, že i když se nejedná o sofistikované zařízení pro měření kontaktního tlaku, které se používá například ve výrobě, je použitá měřicí soustava pro naše měření dostatečná, což potvrzují kontrolní nálepky (viz. Obr. 6. 15). Pro kontrolu oddálení kontaktu byl použit měřicí multimetr s funkcí akustického testu kontinuity (viz. Obr. 6. 16).

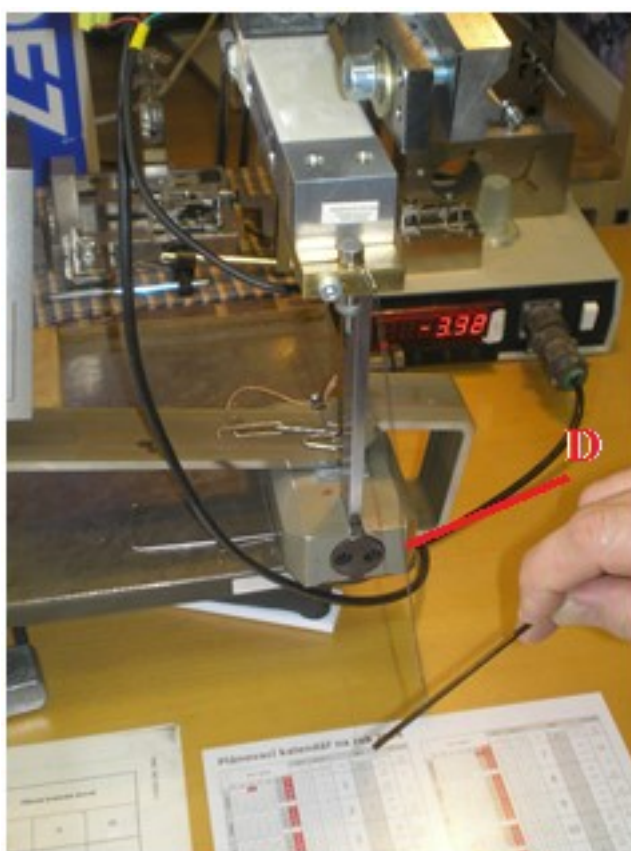


Obr. 6. 15 Měřicí soustava s kontrolními nálepkami

Postup měření spočíval v připojení kontaktního systému jističe BC 160 pomocí drátku **D** k ramenu měřicí soustavy **R**, na jehož povrchu byl umístěn tenzometr **T**, jak je zobrazeno na Obr. 6. 14 a 6. 17. Následně byl na přívodní a vývodní svorky jističe připojen multimetr, na kterém byla nastavena funkce akustického testu vodivosti. Dokud multimetr vydával akustický signál, bylo zřejmé, že kontakty nejsou od sebe oddáleny. Jakmile došlo k přerušení akustického signálu, byla zaznamenána hodnota tlakové síly tlačící kontakty k sobě. Velikost tlakové síly působící na pohyblivý kontakt u testovaného jističe BC 160 je patrná z Obr. 6. 16, tedy $F_k = 7,21\text{ N}$.



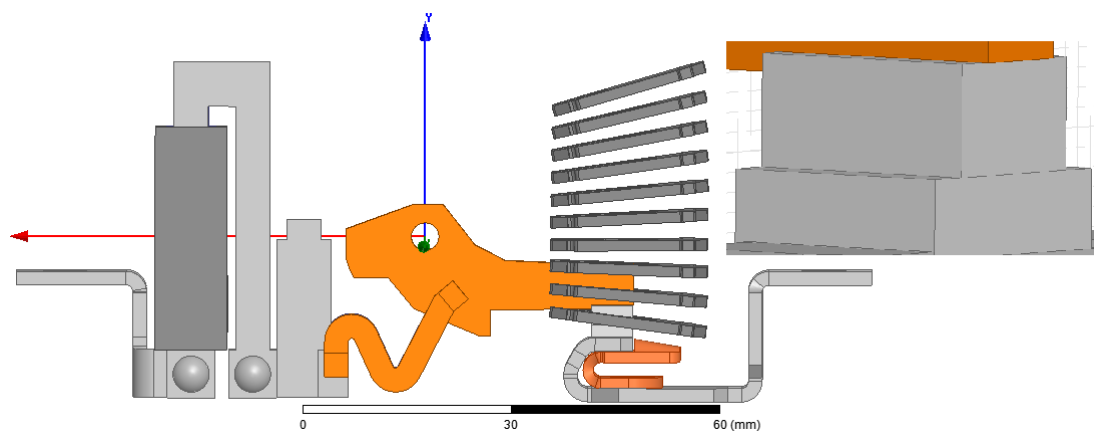
Obr. 6. 16 Vlastní měření kontaktního tlaku



Obr. 6. 17 Drátek připevněný k měřicímu ramenu

6.4 Vliv proudovodné dráhy

Aby bylo možné zohlednit vliv proudovodné dráhy na kontaktní palec a pohyblivý kontakt, bude proveden kontrolní výpočet momentu působícího na zmíněné prvky proudovodné dráhy. Pro potřeby výpočtu byl zhotoven 3D model proudovodné dráhy, v kterém byl realizován kontaktní styk přes celou plochu pohyblivého kontaktu. Toto řešení kontaktního styku vylučuje vznik proudové úžiny mezi kontakty jističe, což zaručuje výpočet pouze vlivu proudovodné dráhy. Jednopolový model je zobrazen na Obr. 6. 18. Výsledky momentů pro zadané proudy jsou uvedeny v Tab. 6. 2. V Tab. 6. 3 jsou uvedeny hodnoty pro grafické znázornění výsledků. Graf momentu M v závislosti na proudu I_k je zobrazen na Obr. 6. 19.



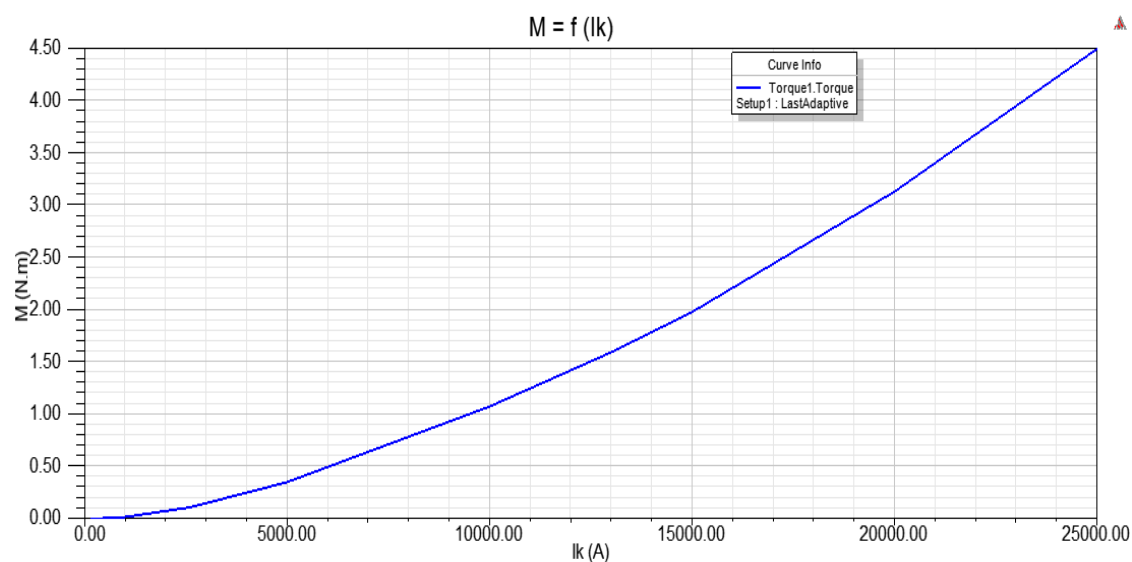
Obr. 6. 18 Jednopolový model s detailem realizovaného kontaktního styku

Tab. 6. 2 Výsledky momentů pro zadané proudy

I_k (kA)	M (N.m)
2,6	0,11
13	1,59
25	4,49

Tab. 6. 3 Hodnoty pro grafické znázornění výsledků

I_k (kA)	M (N.m)
160	0,0004
1000	0,18
2600	0,11
5000	0,35
10000	1,07
13000	1,59
15000	1,98
20000	3,13
25000	4,49



Obr. 6. 19 Graf momentu síly M v závislosti na proudu I_k

Z výsledků uvedených v grafické podobě a tabulkách 6. 2 a 6. 3 je zřejmý vliv proudovodné dráhy na kontaktní palec a pohyblivý kontakt. Moment působící na kontaktní palec vlivem průchodu proudem působí proti kontaktnímu tlaku.

6.5 Výpočet síly v kontaktní úžině na základě teoretického kontaktního styku

Výpočet kontaktního styku na základě teoretických poznatků a vztahů

Pro výpočet průměru idealizované kruhové stykové plošky a následně velikosti síly působící v kontaktní úžině je nutné nejprve vypočíst stykový odpor na mezi svaření pro stříbrné kontakty, podle vztahu (27). Pro jmenovitou mezní zkratovou vypínací schopnost jističe BC 160 – $I_{CU} = 25 \cdot 10^3$ A má stykový odpor na mezi svaření hodnotu

$$R_s \approx \frac{U_{Agsvař}}{1,16 \cdot I_{CU}} = \frac{0,37}{1,16 \cdot 25 \cdot 10^3} = 1,28 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Tab. 6. 4 Hodnoty napětí měknutí a svaření, činitele C_k a tvrdosti podle Brinella H_B pro stříbro [7]

Kov	Měknutí		Svaření		Ck	Tvrdost H_B 10 ⁷ (Pa)
	Teplota (°C)	Napětí (V)	Teplota (°C)	Napětí (V)		
Ag	180	0,09	960	0,37	1,16	30 - 70

Dalším parametrem pro výpočet kruhové stykové plošky je minimální kontaktní tlak, podle vztahu (28). Pro výpočet byla zvolena hodnota materiálové konstanty $k = 3 \cdot 10^4$. Pro výpočet uvažuji bodový styk, proto dosadím za exponent n hodnotu 0,5. Minimální kontaktní tlak při odporu na mezi svaření $R_s = 1,28 \cdot 10^{-5} \Omega$ má velikost

$$F_{kmin} \geq 549,316 \text{ N}$$

Průměr půlkruhové konečné hladiny proudové úžiny vypočtený z rozměrů pohyblivého kontaktu podle vztahu (26)

$$a = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

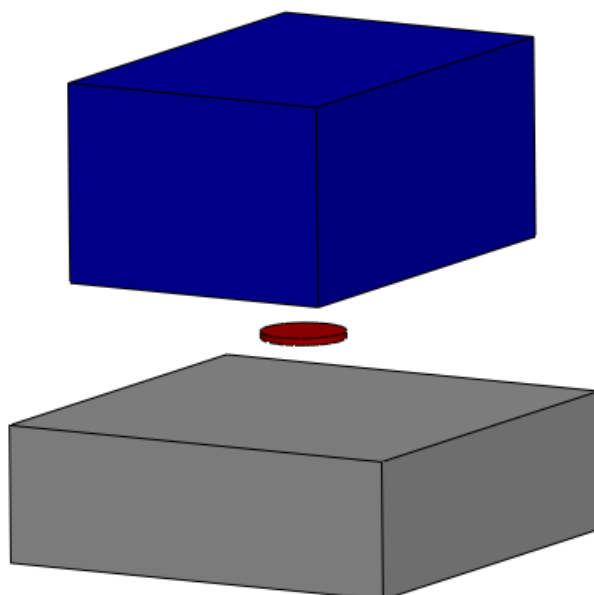
$$b = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D = \sqrt{a \cdot b} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Průměr kruhové stykové plošky vypočtené ze vztahu (25), po dosazení minimálního kontaktního tlaku $F_{kmin} = 549,32 \text{ N}$ a tvrdosti stříbra podle Brinella $H_B = 500 \text{ MPa}$ dosazené z Tab. 6. 2.

$$d = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

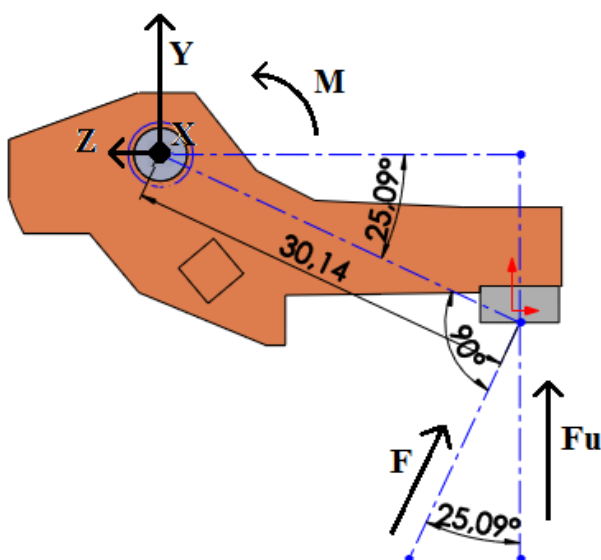
Výsledný kontaktní styk je zobrazen na Obr. 6. 20. Styková plocha byla realizována jako válec o průměru $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ a výšce $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ spojující pohyblivý a pevný kontakt, který je umístěný ve středu obou ploch kontaktů, představuje bodový styk. Na Obr. 6. 20 je červeně znázorněn kontaktní styk, modře pohyblivý kontakt a šedě pevný kontakt.



Obr. 6. 20 Kontaktní styk modelovaný na základě teoretických výpočtů

Výpočet síly působící v kontaktní úžině programem ANSYS Maxwell

Jako výpočetní parametr v programu ANSYS Maxwell byl zvolen moment síly s osou otáčení v ose X . Proto bylo nutné výsledky vypočítané tímto programem podělit vzdáleností mezi momentovým bodem, ležícím ve středu modré kružnice (viz. Obr. 6. 21) a působišťem síly r (m). Aby bylo možné získat hodnotu síly působící v kontaktní úžině F_U (N), bylo nutné hodnotu síly F (N) násobit kosínem úhlu, který svírá se silou F_U působící proti kontaktnímu tlaku a je rovnoběžná s osou Y (viz. Obr. 6. 21). Takto získané výsledky jsou zapsány v tabulce 6. 5. V tabulce 6. 6 jsou uvedeny hodnoty pro grafické znázornění výsledků na Obr. 6. 22, 6. 23 a 6. 24.



Obr. 6. 21 Schéma k přepočtu momentu M na sílu F_U , pro teoretický kontaktní styk

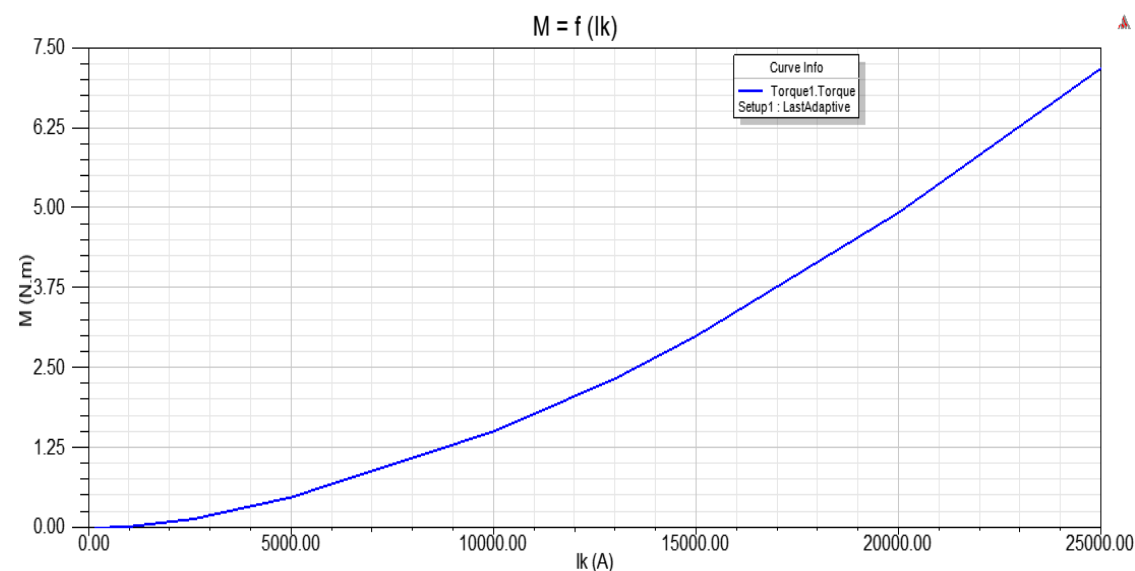
Tab. 6. 5 Výsledky sil působících v kontaktní úžině pro teoretický kontaktní styk

I_k (kA)	M (N.m)	F (N)	F_U (N)
2,6	0,14	4,67	4,2
13	2,43	81	72,9
25	7,48	249,33	224,4

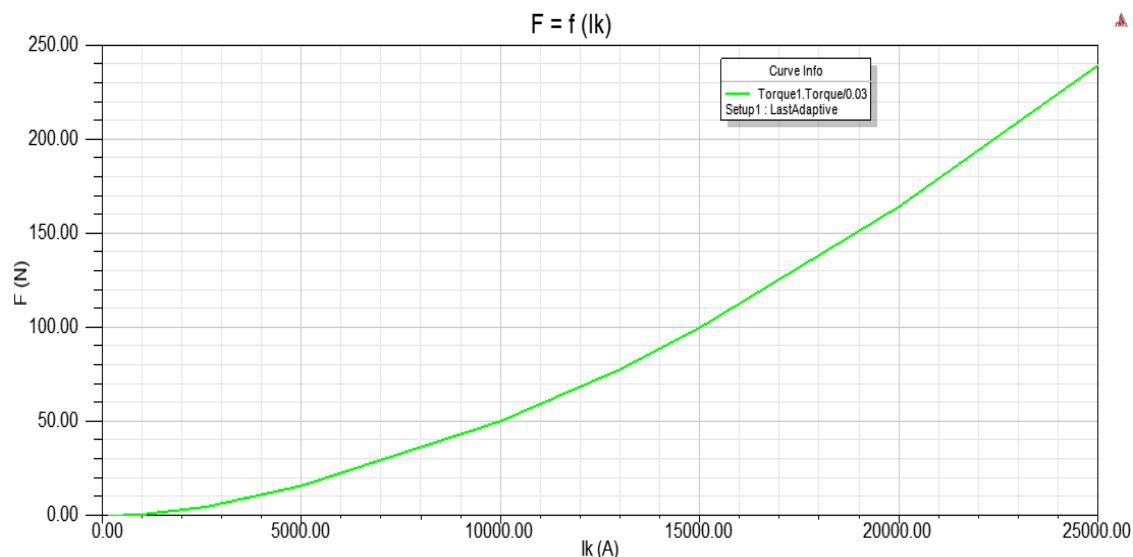
Tab. 6. 6 Hodnoty momentů a sil pro grafické znázornění výsledků v proudové úžině teoretického kontaktního styku

I_k (kA)	M (N.m)	F (N)	F_U (N)
0,16	0,0006	0,02	0,02
1,00	0,020	0,67	0,60
2,60	0,14	4,67	4,20
5,00	0,48	16,00	14,40
10,00	1,51	50,33	45,30
13,00	2,33	77,67	69,90
15,00	3,00	100,00	90,00
20,00	4,92	164,00	147,60
25,00	7,18	239,33	215,40

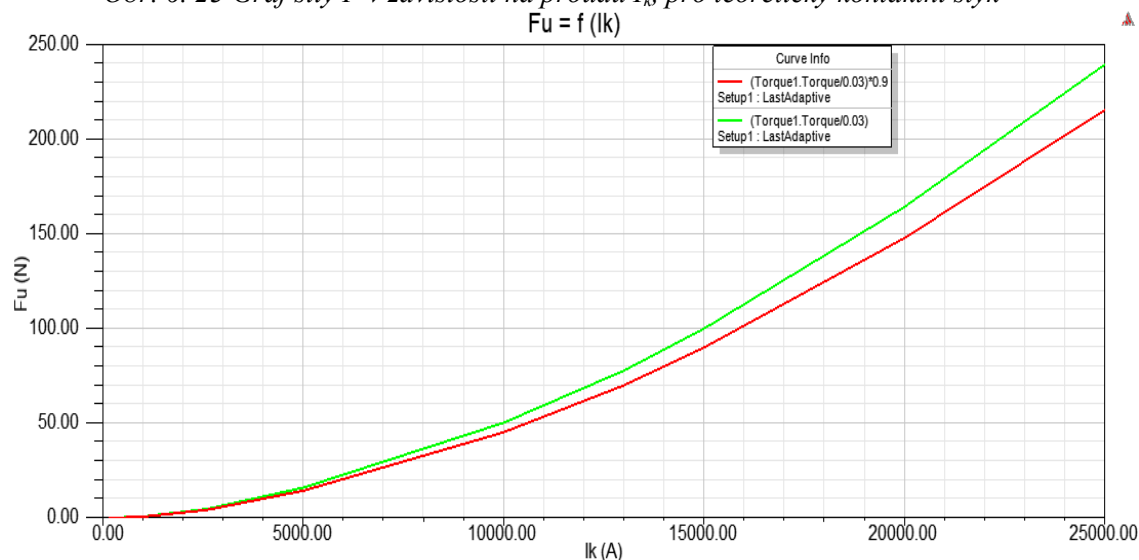
Na Obr. 6. 22, 6. 23 a 6. 24 jsou zobrazeny křivky momentu a sil působících na pohyblivý kontakt a palec pohyblivého kontaktu v závislosti na proudu. Z průběhů je zřejmé, že velikost momentu síly M , stejně jako síly F a F_U , roste zároveň s narůstajícím proudem.



Obr. 6. 22 Graf momentu síly M v závislosti na proudu I_k pro teoretický kontaktní styk



Obr. 6. 23 Graf síly F v závislosti na proudu I_k pro teoretický kontaktní styk



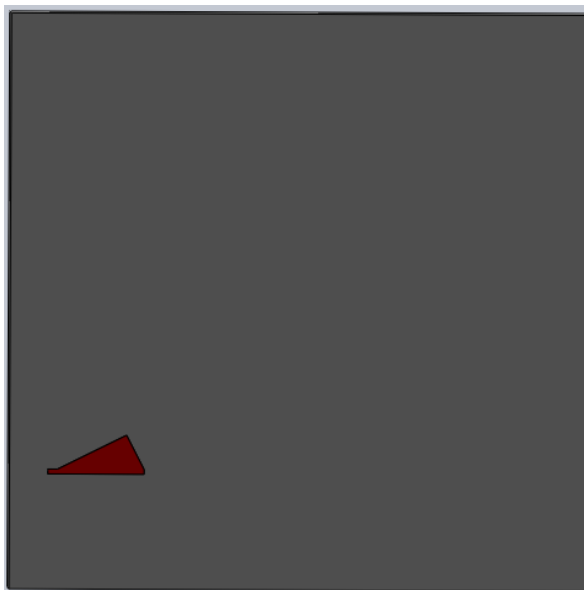
Obr. 6. 24 Graf síly F_U působící v kontaktní úžině v závislosti na proudu I_k pro teoretický kontaktní styk

Na Obr. 6. 24 je zobrazen graf síly F_U (červená křivka) působící v kontaktní úžině v závislosti na proudu sjednocený pro názornější srovnání s grafem síly F , která působí na rameno síly. Z grafu je zřejmé, že síla F_U nabývá menších hodnot, než síla F . Toto je způsobeno násobením síly F kosinem úhlu, který svírá se silou F_U působící v kontaktní úžině, viz Obr. 6. 21.

Je zřejmé, že při teoreticky vypočteném minimálním kontaktním tlaku $F_{kmin} = 549,316$ N a bodovém kontaktním styku o průměru $d = 1,2$ mm, nedojde pro vyhodnocované hodnoty proudu k nadskočení kontaktů. Tato skutečnost však neodpovídá realitě, protože kontaktní tlak jističe BC 160 dosahuje hodnoty $F_k = 7,21$ N, tudíž je jasné, že výsledky výpočtu síly působící v kontaktní úžině na základě teoretického kontaktního styku platí pouze pro teorii a neodpovídají skutečnosti, proto jsem se rozhodl přejít ke kapitole zabývající se výpočtem síly působící v kontaktní úžině jističe BC 160 na základě reálného kontaktního styku.

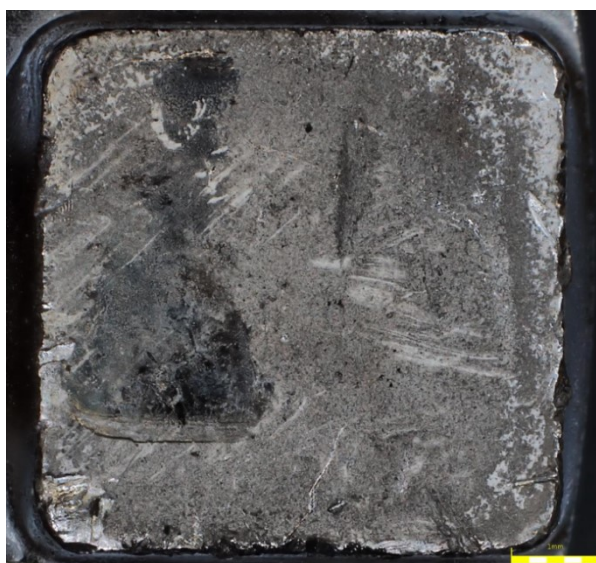
6.6 Výpočet síly v kontaktní úžině na základě reálného kontaktního styku

Kontaktní styk zobrazený na Obr. 6. 25 byl vytvořen na základě pozorování povrchu pevného kontaktu pomocí opto – digitálního mikroskopu. Snímky z mikroskopu jsou zobrazeny na Obr. 6. 26 a 6. 27.



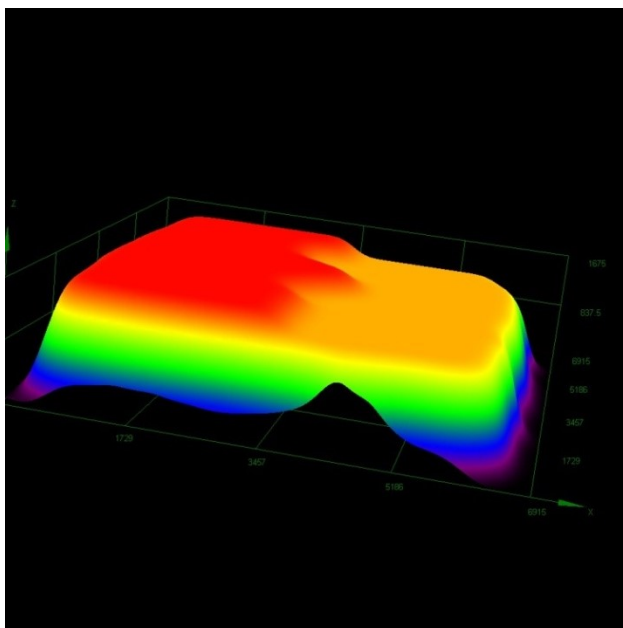
Obr. 6. 25 Kontaktní styk modelovaný na základě reálného

Na Obr. 6. 26 je znázorněn povrch pevného kontaktu pomocí opto – digitálního mikroskopu, na kterém jsou zobrazeny tmavé plochy, kde s největší pravděpodobností vznikne přímkový kontaktní styk. Geometrický útvar na Obr. 6. 25 s plochou $S = 0,21 \text{ mm}^2$ představuje přímkové styky, které vzniknou při každém sepnutí kontaktů jističe BC 160, protože pohyblivý kontakt vykonává při spínacím procesu dva pohyby. Je to rotační pohyb (před dosednutím na pevný kontakt) a vodorovný posuvný přímočarý (posuv po ploše pevného kontaktu), při kterém dojde k zmíněnému kontaktnímu styku. Na Obr. 6. 25 je zobrazen šedě pevný kontakt a červeně kontaktní styk.



Obr. 6. 26 Povrch pevného kontaktu zobrazený mikroskopem

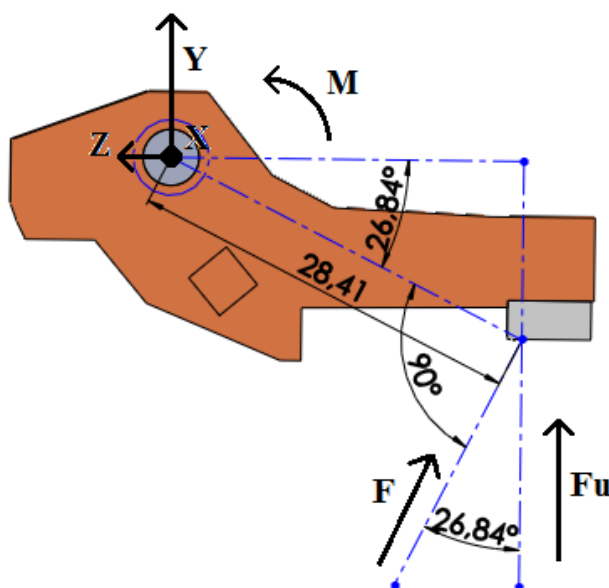
Na Obr. 6. 27, na kterém je zobrazen pevný kontakt ve 3D a červená plocha, která potvrzuje pravděpodobnost vzniku kontaktního styku v tmavých místech na Obr. 6. 26, protože je zřejmé, že její výška dosahuje největších hodnot.



Obr. 6. 27 Povrch pevného kontaktu zobrazený ve 3D

Výpočet v programu ANSYS Maxwell

Tak jako v předešlé kapitole, byl i při výpočtu založeném na reálném kontaktním styku, zadán jako výpočetní parametr moment síly. Princip přepočtu momentu M na síly F a F_U , je stejný jako v předchozí kapitole. Na Obr. 6. 28 je zobrazeno schéma k přepočtu těchto veličin. Výsledky výpočtů jsou zapsány v tabulce 6. 7. V tabulce 6. 8 jsou uvedeny hodnoty pro grafické zobrazení výsledků, zobrazené na Obr. 6. 29, 6. 30 a 6. 31.



Obr. 6. 28 Schéma k přepočtu momentu M na sílu F_U , pro reálný kontaktní styk

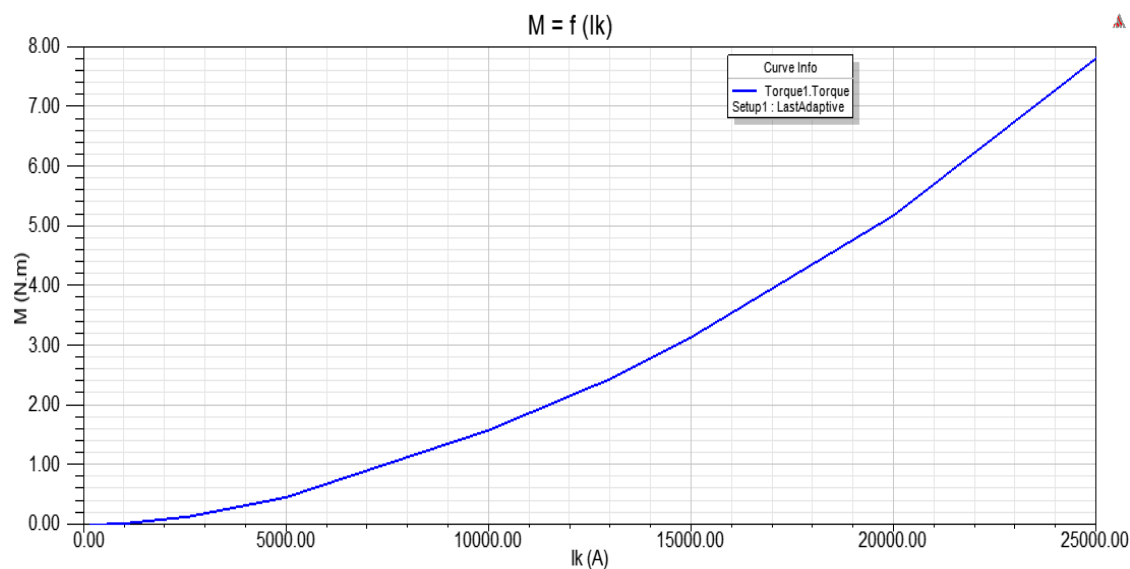
Tab. 6. 7 Výsledky sil působících v kontaktní úžině reálného kontaktního styku, pro zadané proudy

I_k (kA)	M (N.m)	F (N)	F_U (N)
2,6	0,14	4,93	4,4
13	2,44	85,89	76,6
25	7,80	274,55	245,0

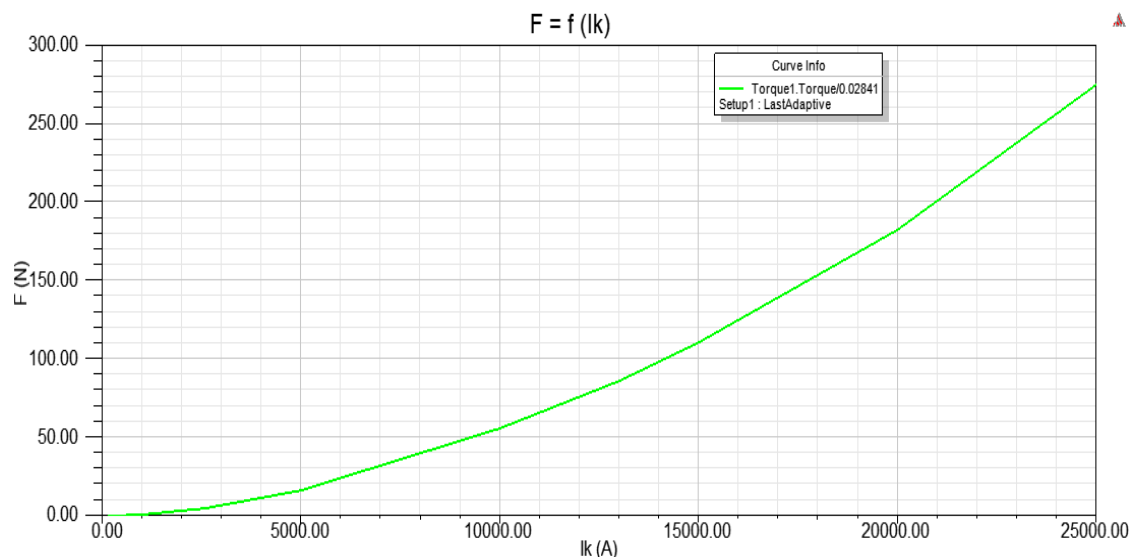
Tab. 6. 8 Hodnoty momentů a sil pro grafické znázornění výsledků v proudové úžině reálného kontaktního styku

I_k (kA)	M (N.m)	F (N)	F_U (N)
0,16	0,0005	0,0176	0,0157
1,00	0,022	0,77	0,69
2,60	0,14	4,93	4,40
5,00	0,46	16,19	14,45
10,00	1,58	55,61	49,62
13,00	2,44	85,89	76,64
15,00	3,14	110,52	98,62
20,00	5,17	181,98	162,38
25,00	7,80	274,55	244,98

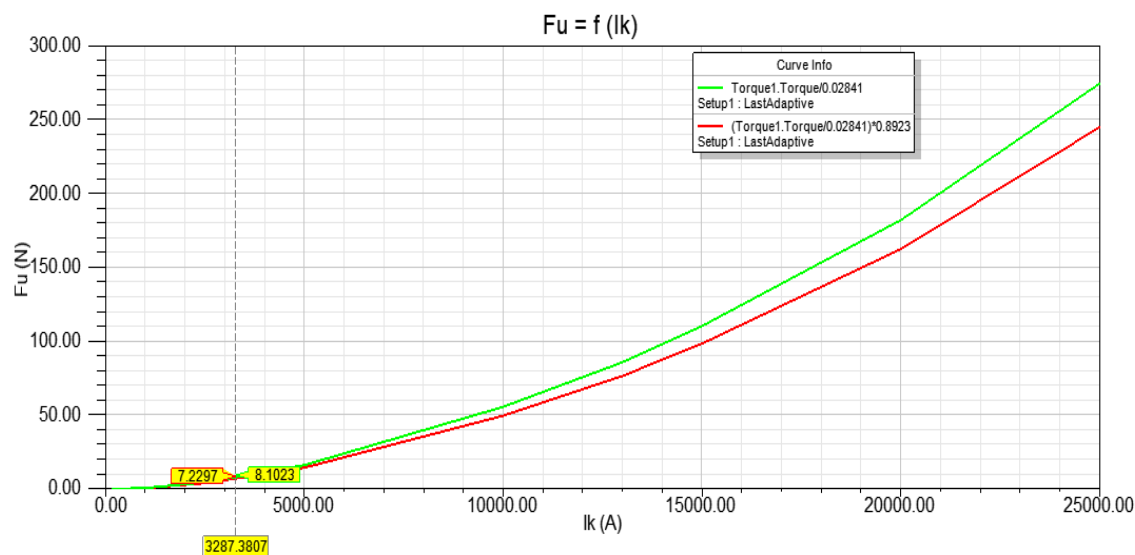
Obr. 6. 29, 6. 30 a 6. 31 zobrazují průběhy momentu a sil působících na pohyblivý kontakt a palec pohyblivého kontaktu v závislosti na proudu. Z průběhů je zřejmé, že stejně jako v předešlém případě roste velikost momentu síly M , síly F a F_U zároveň se vzrůstajícím proudem.



Obr. 6. 29 Graf momentu síly M v závislosti na proudu I_k , pro reálný kontaktní styk



Obr. 6. 30 Graf síly F v závislosti na proudu I_k pro reálný kontaktní styk



Obr. 6. 31 Graf síly F_U působící v kontaktní úžině v závislosti na proudu I_k pro reálný kontaktní styk

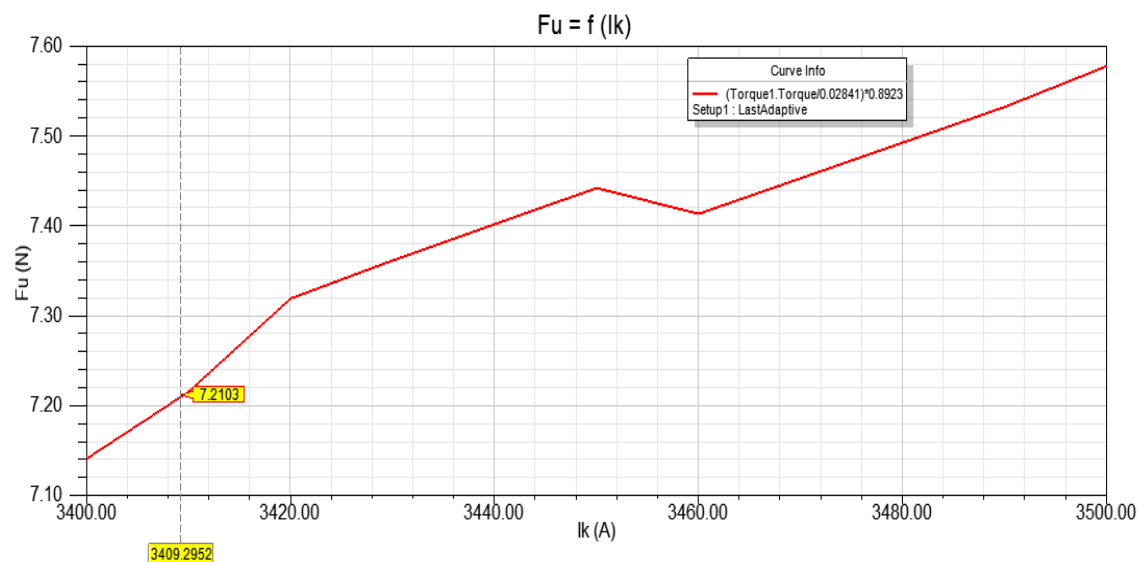
Na Obr. 6. 31 zobrazující graf síly F_U působící v kontaktní úžině jističe BC 160 (červená křivka) společně s grafem síly F (zelená křivka) v závislosti na proudu je vyznačena hodnota síly $F_U = 7,23 \text{ N}$ vyvolaná zkratovým proudem o hodnotě $I_k = 3287,4 \text{ A}$.

Z grafu je vidět, že křivka síly F_U (červená) nabývá menších hodnot než křivka síly F (zelená). Je to dáno přepočtem síly působí přes rameno síly, ke kterému je kolmá na momentový bod umístěný ve středu souřadného systému a svírá s osou Y úhel $26,84^\circ$, viz Obr. 6. 28. Pro získání výsledků síly působící v kontaktní úžině, jejíž vektor je rovnoběžný s osou Y , je nutné násobit výsledky síly F kosinem zmíněného úhlu.

Hodnota síly F_U na Obr. 6. 31 byla zvolena jako nejbližší hodnota síle, od které nastane nadskočení kontaktů jističe BC 160. Protože kontaktní tlak jističe BC 160 dosahuje hodnoty $F_k = 7,21 \text{ N}$ je zřejmé, že hodnota síly a tudíž i hodnota proudu není přesná.

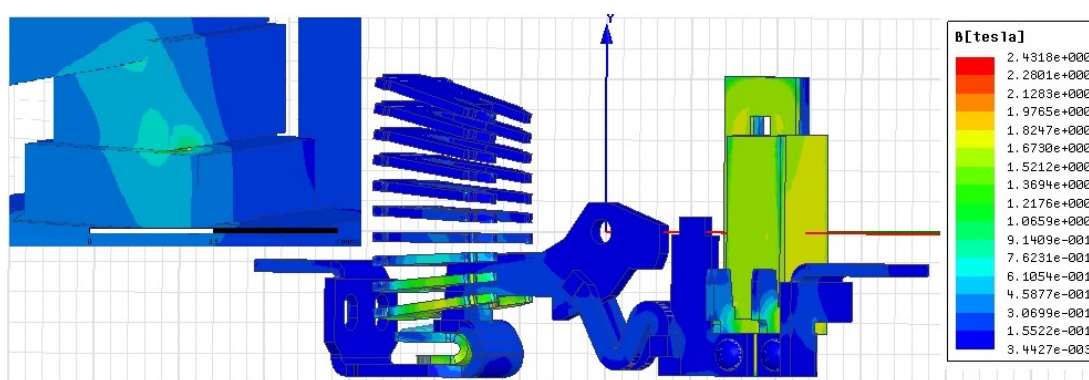
Toto je způsobeno zadanými hodnotami proudů, mezi kterými je velký výpočetním krok, viz Tab. 6. 8. Aby mohl program ANSYS Maxwell vynést grafické znázornění výsledků, provedl interpolaci vypočtených sil pro zadané hodnoty proudů, čímž vznikla chyba ve výpočtu.

Z tohoto důvodu byl proveden zpřesňující výpočet hodnoty proudu, při které dojde k rovnovážnému stavu mezi kontaktním tlakem a silou působící v kontaktní úžině proti kontaktnímu tlaku a nastane nadskočení kontaktů. Pro výpočet byly zadány hodnoty proudů od 3400 A do 3500 A s výpočetním krokem 10 A .

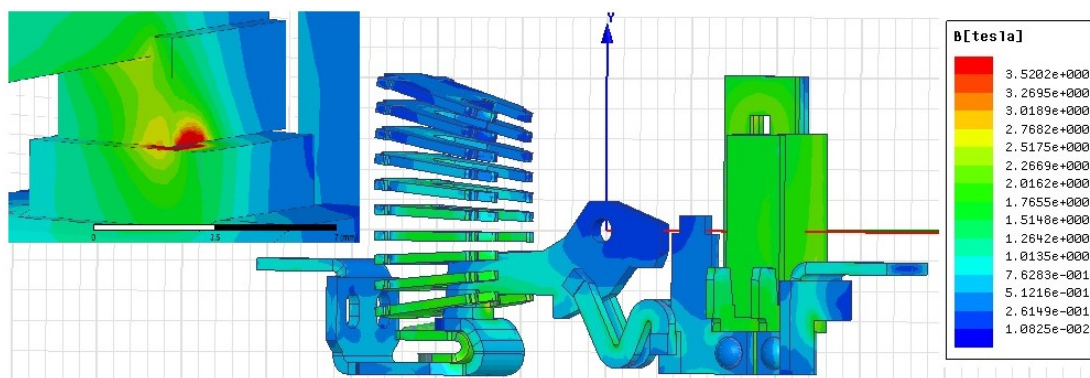


Obr. 6. 32 Průběh síly F_U v závislosti na proudu s hodnotou proudu nadskočení kontaktů, pro reálný kontaktní styk

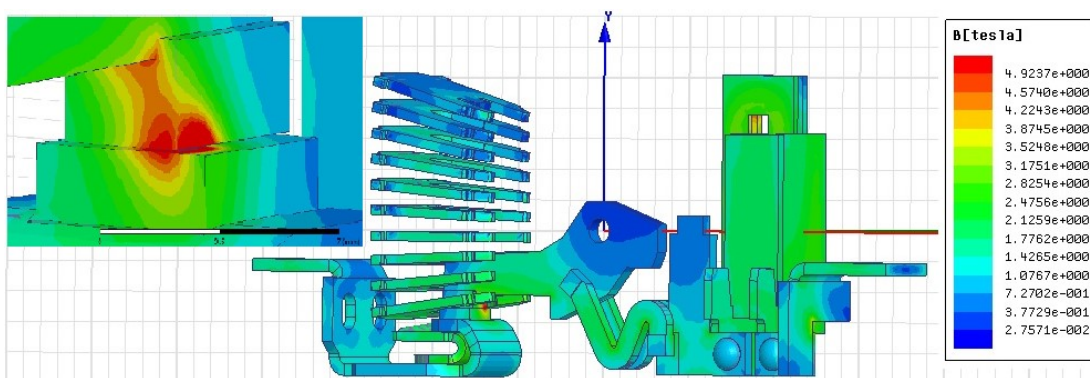
V grafu na Obr. 6. 32 je vyznačena hodnota zkratového proudu $I_k = 3409,3\text{ A}$, při které dojde k nadskočení kontaktů jističe pro reálný kontaktní styk. Rozdíl mezi hodnotami proudu z Obr. 6. 31 a 6. 32 tvoří zhruba 120 A .



Obr. 6. 33 Rozložení magnetické indukce $B\text{ (T)}$ v proudovodné dráze a kontaktním styku pro $I_k = 2,6\text{ kA}$



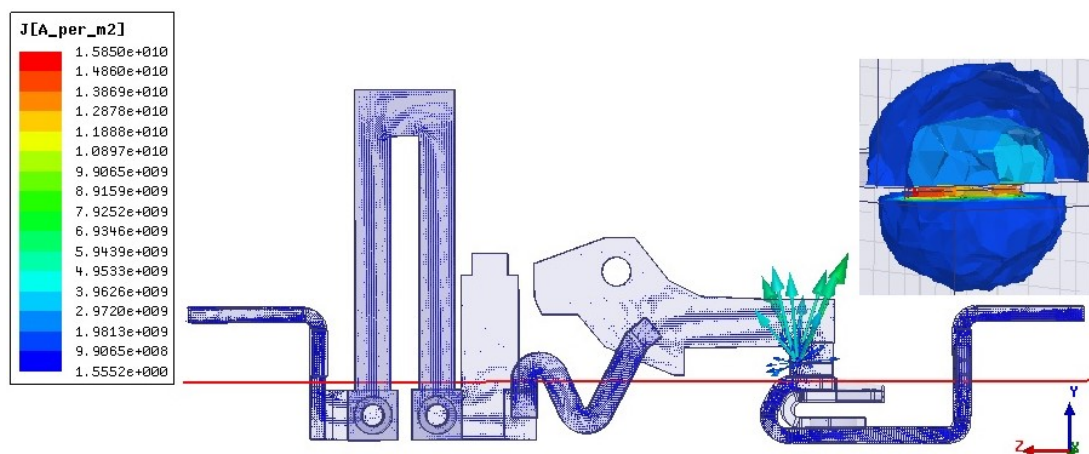
Obr. 6. 34 Rozložení magnetické indukce B (T) v proudovodné dráze a kontaktním styku pro $I_k = 13$ kA



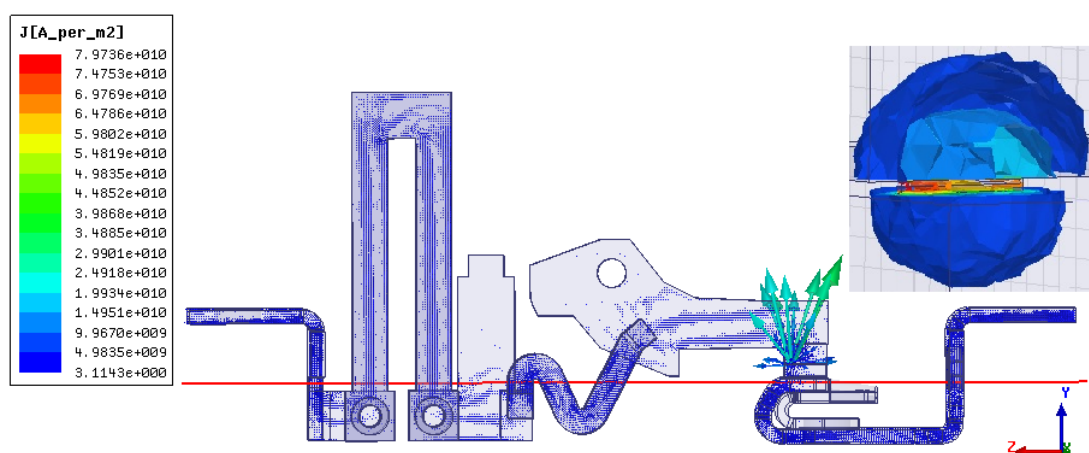
Obr. 6. 35 Rozložení magnetické indukce B (T) v proudovodné dráze a kontaktním styku pro $I_k = 25$ kA

Z Obr. 6. 33, 6. 34 a 6. 35, které zobrazují rozložení magnetické indukce v proudovodné dráze a modelovaném kontaktním styku jističe BC 160 pro zadané proudy, je zjevné, že nejvyšších hodnoty magnetické indukce je dosahováno v oblasti modelovaného kontaktního styku, což je způsobeno velkou hodnotou proudové hustoty v kontaktním styku a dále charakterem zakřivení proudovodné dráhy v místě kontaktního styku. Největší hodnoty dosahuje magnetická indukce v kontaktním styku pro proud $I_k = 25$ kA, viz Obr. 6. 35. Magnetická indukce pro tuto hodnotu proudu dosahuje v tomto místě velikost $B = 4,92$ (T).

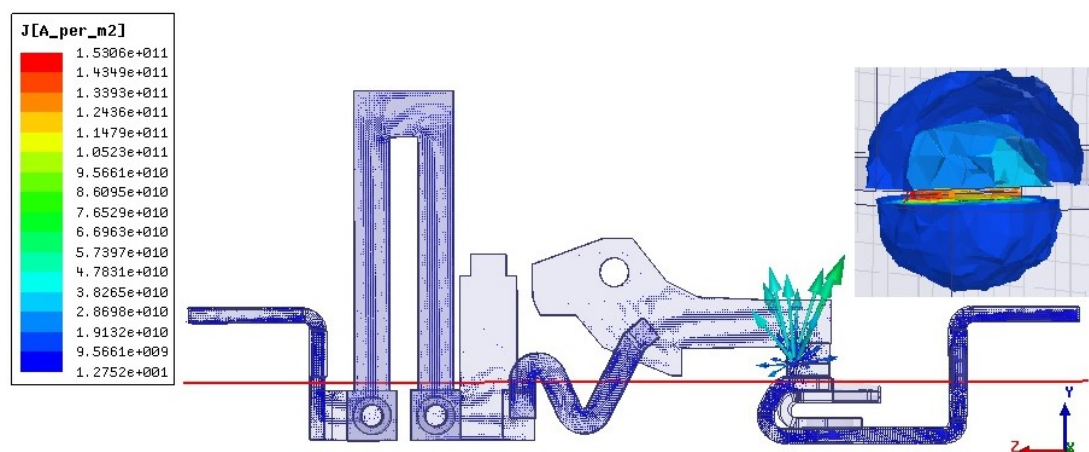
Magnetická indukce nabývá velkých hodnot i v nelineárních prvcích, respektive v kotvě a jhu elektromagnetické spouště, bimetalovém prvku nadproudové spouště a v lamelách zhášecí komory, což nejlépe zobrazuje Obr. 6. 33, na kterém je rozložení magnetické indukce pro zkratový proud $I_k = 2,6$ kA. Pro zmíněnou hodnotu zkratového proudu dosahuje magnetická indukce v nelineárních prvcích velikosti $B = 1,83$ (T). Nejvyšších hodnot v nelineárních prvcích je dosaženo pro zkratový proud $I_k = 25$ kA, kde tato veličina nabývá hodnoty $B = 2,48$ (T). Tato skutečnost vyplývá z magnetických vlastností a také B – H charakteristiky materiálu zadaného pro tyto prvky proudovodné dráhy.



Obr. 6. 36 Rozložení vektorů proudové hustoty J (A/m^2) v proudovodné dráze se zobrazením kontaktního styku, pro $I_k = 2,6$ kA



Obr. 6. 37 Rozložení vektorů proudové hustoty J (A/m^2) v proudovodné dráze se zobrazením kontaktního styku, pro $I_k = 13$ kA



Obr. 6. 38 Rozložení vektorů proudové hustoty J (A/m^2) v proudovodné dráze se zobrazením kontaktního styku, pro $I_k = 25$ kA

Rozložení vektorů proudové hustoty J (A/m^2) je zobrazeno na obrázcích 6. 36, 6. 37 a 6. 38, na kterých jsou viditelné maximální hodnoty dosažené v kontaktním styku, vlivem snížení průřezu proudovodné dráhy v místě kontaktního styku. Z obrázků rozložení

proudové hustoty, v detailním zobrazení kontaktů, jsou patrné izoplochy proudové hustoty, ve kterých je hodnota proudové hustoty konstantní.

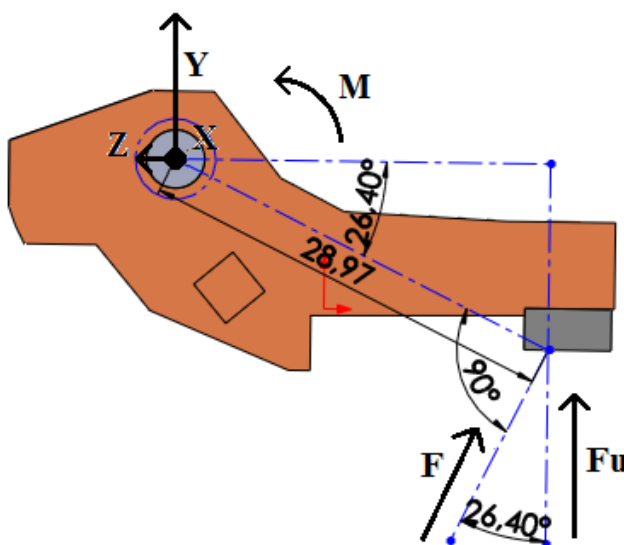
Z rozložení proudové hustoty v proudovodné dráze je zjevné, že prvky, např. palec pohyblivého kontaktu není využíván jako vodič proudu v celém svém objemu. Tento vjem je důležitý například pro analytický výpočet, při kterém by tento fakt hrál důležitou roli, například pro zjednodušení geometrie prvků sloužících k výpočtu. Naopak je z obrázku zřejmé, že je nutno při analytickém výpočtu síly působící v kontaktní úžině brát v úvahu větší část proudovodné dráhy a ne jen kontaktní styk.

6.7 Výpočet sil v kontaktní úžině pro ověření proudu nadskočení kontaktů

Důvodem provedení výpočtu sil působících v kontaktní úžině pro modelovaný kontaktní styk, zobrazený na Obr. 6. 36, bylo ověření, zda dojde k nadskočení kontaktů zkoumaného jističe BC 160, při proudu $I_k = 2,6 \text{ kA}$ (nebo v okolí této hodnoty), pro kontaktní tlak $F_k = 7,21 \text{ N}$. Proto byl modelován kontaktní styk s plochou o velikosti $S = 4,98 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2$. Je zřejmé, že kontaktní styk s plochou řádově v desítkách nanometrů při výše zmíněném kontaktním tlaku a s plochou pohyblivého kontaktu $S_{pk} = 24 \text{ mm}^2$, nemůže vzniknout. Na Obr. 6. 36 je znázorněn modře pohyblivý kontakt, šedě pevný kontakt a červený kvádr představující přímkový kontaktní styk. Výsledky sil jsou zobrazeny v tabulce 6. 5.



Obr. 6. 39 Kontaktní styk pro nadskočení kontaktů při $I = 2,6 \text{ kA}$



Obr. 6. 40 Schéma k přepočtu momentu M na sílu F_u pro modelovaný kontaktní styk

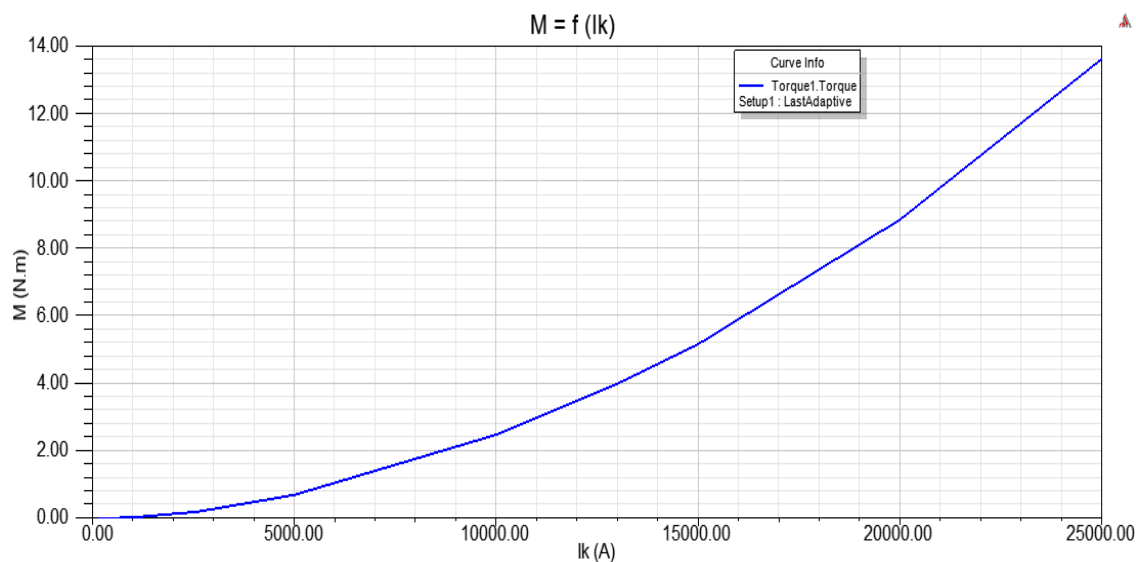
Tab. 6. 9 Výsledky sil působících v kontaktní úžině pro zadané proudy

I_k (kA)	M (N.m)	F (N)	F_U (N)
2,6	0,20	6,90	6,21
13	4	137,93	122,76
25	13,48	464,83	413,7

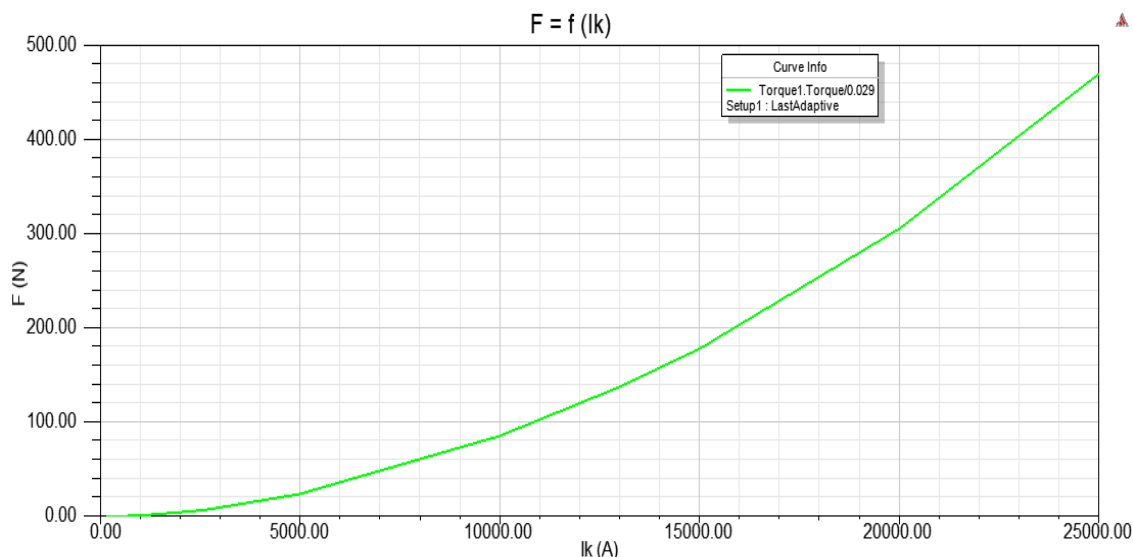
Tab. 6. 10 Hodnoty momentů a sil pro grafické znázornění výsledků v proudové úžině modelovaného kontaktního styku

I_k (kA)	M (N.m)	F (N)	F_U (N)
0,16	0,0008	0,03	0,02
1,00	0,030	1,03	0,93
2,60	0,20	6,90	6,21
5,00	0,7	24,14	21,48
10,00	2,44	84,14	75,72
13,00	4,00	137,93	122,76
15,00	5,20	179,31	159,59
20,00	8,80	303,45	270,1
25,00	13,48	464,83	413,7

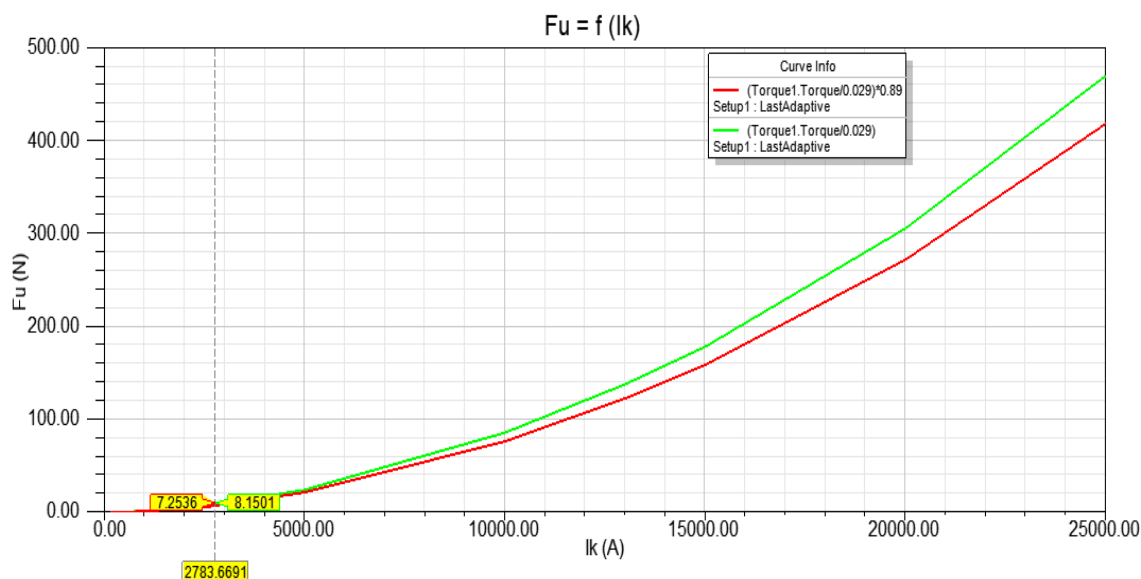
Obr. 6. 27, 6. 28 a 6. 29 zobrazují průběhy momentu a sil působících na pohyblivý kontakt a palec pohyblivého kontaktu v závislosti na proudu. Z průběhů je zřejmé, že stejně jako v předešlém případě, roste velikost momentu síly M , síly F a F_U zároveň se vzrůstajícím proudem.



Obr. 6. 41 Graf momentu síly M v závislosti na proudu I_k - $M = f(I_k)$

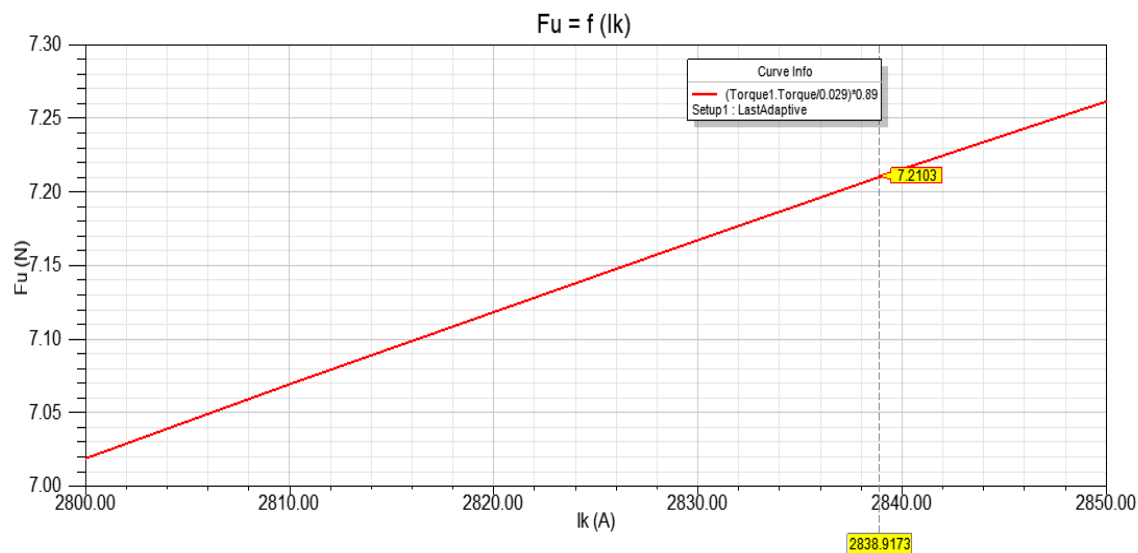


Obr. 6. 42 Graf síly F v závislosti na proudu I_k - $F = f(I_k)$



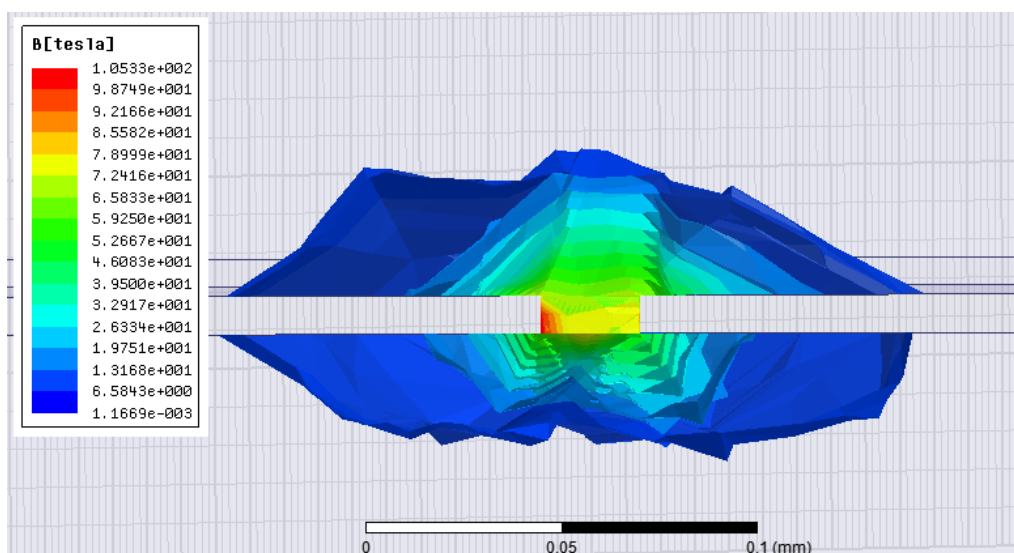
Obr. 6. 43 Graf síly F_U působící v kontaktní úžině v závislosti na proudu I_k - $F_U = f(I_k)$

V grafu na Obr. 6. 41 zobrazujícím křivku síly F_U (červená) sjednocený pro názornější srovnání s grafem síly F (zelená) v závislosti na proudu je označená hodnota blízká proudu, při kterém dojde k nadskočení kontaktů. Hodnota zkratového proudu $I_k = 2784 \text{ A}$ není přesná, protože hodnota síly byla zvolena jako nejbližší hodnota k velikosti kontaktního tlaku jističe. Dalším důvodem nepřesnosti je fakt, že pro výpočet byly zadány hodnoty proudů (viz. Tab. 6. 8) s velkým výpočetním krokem. Aby mohl program ANSYS Maxwell vynést grafické znázornění výsledků sil pro zadané provedl interpolaci, čímž vznikla chyba ve výpočtu. Proto byl proveden výpočet, pro který byly zadány hodnoty proudu od 2800 A do 2850 A , s krokem 10 A . Výsledný graf je zobrazen na Obr. 6. 42.

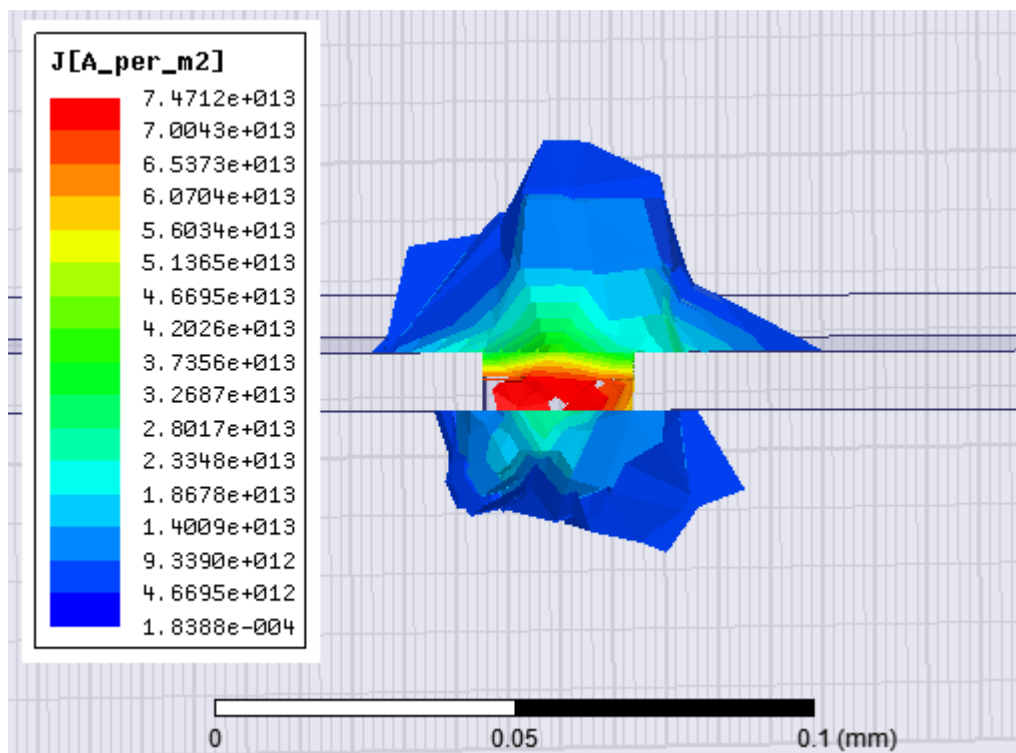


Obr. 6. 44 Průběh síly F_U v závislosti na proudu s hodnotou proudu nadskočení kontaktů

V grafu na Obr. 6. 42 je vyznačena hodnota proudu $I_k = 2839$ A, při které dojde k nadskočení kontaktů jističe pro modelovaný kontaktní styk. Rozdíl mezi hodnotami proudu z Obr. 6. 41 a 6. 42 tvoří cca **56 A**.



Obr. 6. 45 Rozložení proudové hustoty J (A/m²) v řezu kontaktního styku pro $I = 2839$ A



Obr. 6. 46 Rozložení magnetické indukce B (T) v kontaktním styku pro $I = 2839$ A

Z extrémních hodnot rozložení proudové hustoty J (A/m^2) v kontaktním styku pro proud $I_k = 2839$ A, na Obr. 6. 43 je patrné, že kontaktní ploška o této velikosti by nevydržela ani jmenovitý proud jističe BC 160 ($I_n = 160$ A) a došlo by k odpaření materiálů kontaktů v místě styku.

Vlivem obrovských hodnot proudové hustoty nabývá i magnetická indukce B (T) v kontaktním styku extrémních hodnot, jak je zobrazeno na Obr. 6. 44. Dalším vlivem způsobujícím velké hodnoty indukce je charakter zakřivení proudovodné dráhy v kontaktní úžině.

7. Závěr

Pomocí programu ANSYS Maxwell byly v diplomové práci vypočteny hodnoty momentů, které byly dále přepočteny na síly působící v kontaktních úžinách tří zvolených kontaktních styků pro zadané proudy. Z výsledků je zřejmé, že velikost síly působící v kontaktní úžině je silně závislá na velikosti proudu, respektive roste se čtvercem proudu a dále je závislá na velikosti kontaktní plochy, což dokazují různé výsledky sil pro zadané proudy u jednotlivých kontaktních styků. Výpočet v podstatě potvrdil teoretický vztah pro výpočet síly působící v proudovodné úžině.

Dále byly pomocí výpočtů zjištěny proudy pro jednotlivé kontaktní styky, při kterých nastane rovnovážný stav mezi kontaktním tlakem jističe BC 160, působící přes kontaktní pružinu na měděný kontaktní palec, ke kterému je připevněn pohyblivý kontakt, a silou působící v kontaktní úžině vlivem těchto proudů. Je nutné podotknout, že u kontaktního styku modelovaného na základě teoretických výpočtů nedojde k nadskočení kontaktů vlivem velkého kontaktního tlaku, který ovšem neodpovídá skutečnosti. U kontaktního styku, modelovaného na základě vizuální analýzy pevného kontaktu, dojde podle výpočtu v programu ANSYS Maxwell k nadskočení kontaktů při překročení zkratového proudu s hodnotou $I_k = 3409,3 \text{ A}$, u které dosahuje síla působící v proudové úžině hodnoty $F_U = 7,21 \text{ N}$.

Další provedení kontaktního styku je realizováno na základě hodnoty zkratového proudu poskytnutou zadavatelem diplomové práce. Zadavatel uvádí nadskočení kontaktů u různých kusů jističe BC 160 při dosažení zkratového proudu $I_k = 2,6 \text{ kA}$. Proto byl modelován kontaktní styk o ploše $S = 4,98 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2$, pro který dojde k nadskočení kontaktů při dosažení zkratového proudu $I_k = 2839 \text{ A}$. Velikost proudu vypočítaná programem ANSYS Maxwell je závislá na velikosti kontaktní plochy a nachází se pouze v okolí zmíněné velikosti proudu udané zadavatelem. Tato skutečnost je dána faktem, že při kontaktním tlaku měřeného kusu jističe BC 160 nemůže vzniknout tak malá kontaktní plocha, aby došlo k nadskočení kontaktů při vypočtené hodnotě proudu. Proto nebylo nutné při modelování kontaktního styku další zmenšení této plochy pro dosažení proudu uvedeného výrobcem, při kterém nadskočí kontakty jističe BC 160.

Důvodem vzniku kontaktního styku s výše uvedenou velikostí plochy může být extrémní nerovnost povrchu obou kontaktů jističe. V takovém případě pak dochází k nadskočení kontaktů při zkratovém proudu $I_k = 2,6 \text{ kA}$. Další příčinu shledávám v různých hodnotách, respektive menších hodnotách kontaktních tlaků jističů BC 160, u kterých došlo k nadskočení kontaktů při překročení výše zmíněné hodnoty proudu. Jak je zřejmé, z podkapitoly 6. 4 má i samotná proudovodná dráha vliv na pohyblivý kontakt, respektive na kontaktní palec a snaží se jej nadzvednout.

Osobní přínos práce spatřuji v osvětlení problematiky sil působících na proudovodnou dráhu jističe a dále v možnostech řešení tohoto problému. Další přínos vidím v seznámením se s programem ANSYS Maxwell. Tato práce může v budoucnu posloužit jako návod, jak řešit výpočet síly působící v proudovodných úžinách nejen jističů, ale i dalších elektrických přístrojů pomocí metody konečných prvků, neboť analytické řešení této problematiky je z hlediska matematických a časových nároků obtížné.

V budoucnu by bylo možné práci zdokonalit použitím tří pólového 3D modelu proudovodné dráhy spolu s tranzientním řešením problematiky a větším výpočetním výkonem počítače.

Závěrem je nutno říci, že i přes velké nároky na výpočetní výkon počítače má metoda konečných prvků obrovský potenciál a to obzvlášť při použití v této práci, protože nadskočení kontaktů každého jističe má devastující účinek. Ať už se jedná o devastaci působící na povrch kontaktů jističe v případě, že je vybavovací pružina dostatečně silná a dokáže od sebe odtrhnout kontakty svařené vlivem elektrického oblouku, nebo na samotný jistič a jištěné zařízení, pokud síla pružiny nestačí na odtržení kontaktů. Na druhou stranu je tento jev využíván v některých případech pro rychlejší oddálení kontaktů jističe a tím i jeho rychlejší vypnutí.

8. Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 60947-2 ed. 3. *Spínací a řídicí přístroje NN: Část 2. Jističe*.
- [2] KAČOR, Petr. HELŠTÝN, David. HYTKA, Zdeněk. *Elektrické přístroje spínací, ochranné a jisticí: průvodce studiem* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2003. ISBN 80-248-0315-1.
- [3] *Jističe*. In: ING. BEŠTA, M. [online]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T1.4-JISTI%C4%8CE.pdf>
- [4] Firemní literatura OEZ Letohrad s.r.o, *Katalog Modeion: Kompaktní jističe*, 2013, www.oez.cz
- [5] HYNEK, Jiří. *Modeion BC160: benjamínek doplnil řadu*. In: Odborné časopisy [online]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26691
- [6] Firemní literatura OEZ Letohrad s.r.o, *Katalog Modeion: Příručka nadproudové spouště*, 2013, www.oez.cz
- [7] ING. OTTO HAVELKA, Csc., a kolektiv. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů*. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1985, 186 s.
- [8] ING. OTTO HAVELKA, Csc., a kolektiv. *Stavba elektrických přístrojů 1*. První. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1984, 262 s.
- [9] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. *Metoda konečných prvků: Úvod* [online]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [10] Ansys: *ANSYS Maxwell* [online]. 2014. vyd. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Systems+&+Multiphysics/Multiphysics+Enabled+Products/ANSYS+Maxwell>
- [11] KAČOR, Petr. *Metoda konečných prvků: Řešení silových účinků elektromagnetického pole*. [online]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/

9. Seznam příloh

Příloha 1. – DP_teor_final_V1.mxwl

Model proudovodné dráhy bez kontaktního styku v programu ANSYS Maxwell, pro ověření vlivu proudovodné dráhy.

Příloha 2. – DP_teor_final_V2.mxwl

Model proudovodné dráhy s teoretickým kontaktním stykem v programu ANSYS Maxwell, pro výpočet síly v kontaktní úžině na základě teoretického kontaktního styku.

Příloha 3. – DP_real_final.mxwl

Model proudovodné dráhy s teoretickým kontaktním stykem v programu ANSYS Maxwell, pro výpočet síly v kontaktní úžině na základě reálného kontaktního styku.

Příloha 4. – DP_kont_pro_2,6kA.mxwl

Model proudovodné dráhy s teoretickým kontaktním stykem v programu ANSYS Maxwell, pro výpočet síly v kontaktní úžině pro kontaktní styk realizovaný na základě proudu nadskočení.